شروحات المواد باللغة العربية

قسم الهندسة الكهربائية

****

الآلات الكهربائية

عدد الصفحات: ٢٣٠ صفحة

١,١ الدوائر المغناطيسية

مقدمة:

تلعب المغناطيسية دورا تكامليا تقريبا في كل الأجهزة الكهربائية المستخدمة اليوم في الصناعة . تستعمل كل من المولدات، المحركات ، المحولات التأثير المغناطيسي للحصول على خواص أداء مختلفة.

المواد المغناطيسية تشكل جزءا هاما في تركيب الآلات الكهربائية فهي تشكل و توجه المجالات المغناطيسية التي تمثل الوسط التي تتم فيه عملية تحويل الطاقة من طاقة ميكانيكية إلى طاقة كهربائية في حالة فعل المولد و العكس صحيح في حالة فعل المحرك . من اللازم إذا أن تحتوي الآلة الكهربائية على دائرة مغناطيسية للحصول على كثافة تدفق مغناطيسي عالية في حجم محدود و التي ينتج عنها عزم قوي أو قدرة خرج عالية لوحدة الحجم مع أن هذه الكثافة العالية لا تتطلب إلا مفقودات قدرة قليلة . معنى هذا أن حجم الآلة سيقلص كثيرا باستعمال المواد المغناطيسية .

في المحولات تكون الدائرة المغناطيسية مغلقة بينما في الآلات الكهربائة الدوارة تحتوي على عنصرين أساسيين هما العضو الثابت و العضو الدائر منفصلين بثغرة هوائية .

في معضم الآلات الكهربائية ما عدا ذات المغناطيس الدائم ، يتم توليد المجال المغناطيسي بتمرير تيار كهربائي في ملف ملفوفا على مادة حديدية مغناطيسية .

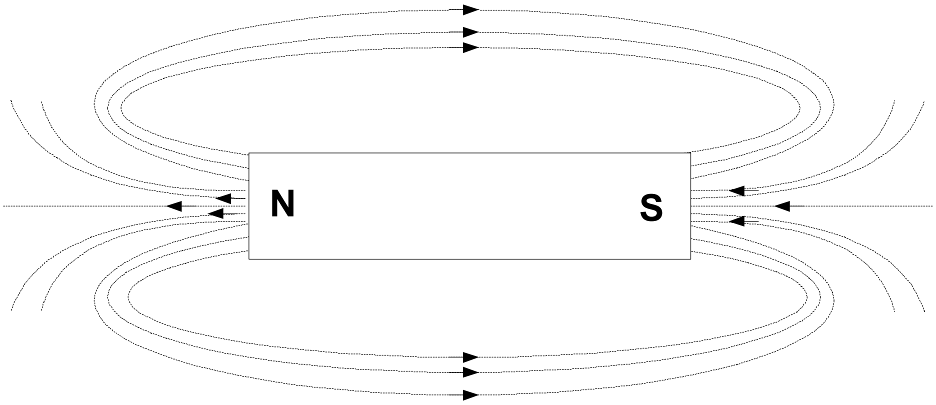
في هذا الفصل تتم مراجعة المقادير المغناطيسية التي يمكن مصادفتها في الآلات الكهربائية و العلاقة بين تيارات الاستثارة أو التيارات الممغنطة و قيمة التدفق المغناطيسي في الأجزاء المختلفة في الدائرة المغناطيسية . يخصص مكان مهم لقانون أوم للدوائر المغناطيسية .

بعض التعريفات الهامة في علم المغناطيسية :

١ - **المجال المغناطيسي** : هو المنطقة الموجودة حول قطعة حديدية ذات مغناطيس دائم أو حول موصل يمر فيه تيار كهربائي حيث يتعرض أي قطب مغناطيسي إذا ما وجد فيها إلى قوة ميكانيكية يسببها المغناطيس الدائم أو التيار .

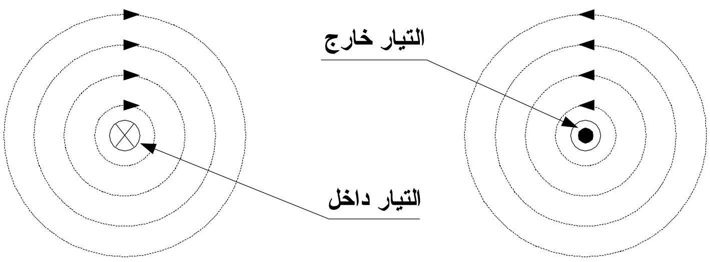
٢ - **المغناطيس الدا ئم** : تولد المادة المكون منها المغناطيس الدائم حولها مجالا مغناطيسيا بدون الحاجة إلى الاستثارة بتمرير تيار في ملف .

٣ - **خطوط القوى** : هي خطوط المجال المغناطيسي حيث المماس عند أي نقطة على هذا الخط يعطي اتجاه شدة المجال المغناطيسي أو القوة الممغنطة عند هذه النقطة .

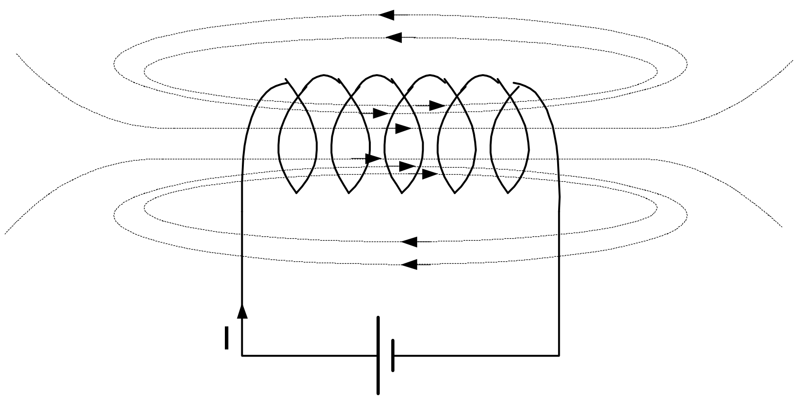


شكل ١.١ : خطوط القوى لمغناطيس دائم

خطوط القوى هي خطوط صورية في المجال المغناطيسي ، تساعد على تصور توزيع هذا المجال وكثافته . كل خط من هذه الخطوط يشكل مسارا مغلقا . الخطوط لا تتقاطع أبدا و لها دائما اتجاه معيّن ، وتكون دائرية حول موصل طويل و مستقيم عندما يمر فيه تيار كهربائي .

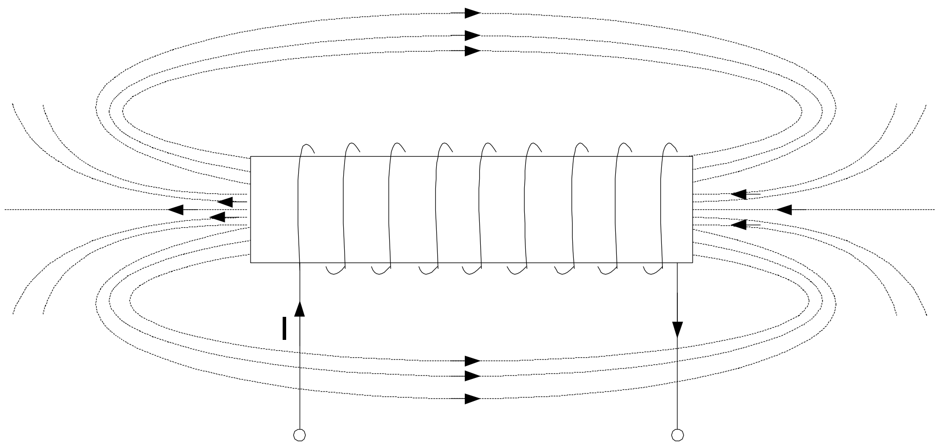


شكل ٢,١ : خطوط القوى لمجال حول موصل يمر فيه تيار



شكل٣,١ : خطوط القوى لمجال ملف يمر فيه تيار

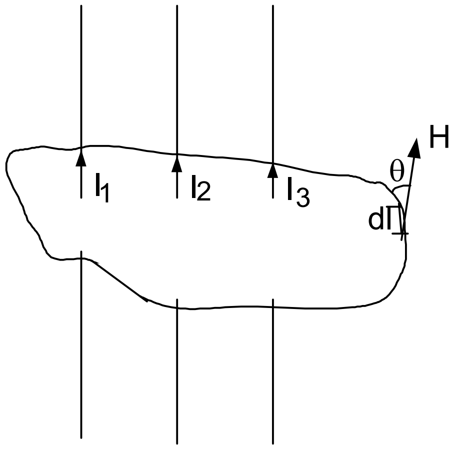
يعطى اتجاه خطوط المجال بقاعدة اليد اليمنى بحيث إذا مسكنا الموصل أو الملف باليد اليمنى تكون الأصابع الأربعة تشير إلى التيار و الإبهام هو الذي يشير إلى القطب الشمالي .
يمكن تقوية شدّة مجال الملف بإستخدام بعض المواد المغناطيسية داخل الملف كالحديد ، الصلب ، الكوبالت فنحصل على ما نسميه بالمغناطيس الكهربائي



شكل ٤،١ : خطوط القوى لمجال مغناطيس كهربائي

للمغناطيس الكهربائي كل خواص المغناطيس الدّائم ، زيادة على هذا يمكن التحكم في شدّة مجاله بتغيير التيار أوعدداللفات . بالطبع من اللازم أن يمر التيار في ملف المغناطيس الكهربائي لتوليد المجال المغناطيسي حوله بينما لا تستدعي الحاجة لا للملف و لا للتيار في المغناطيس الدّائم .
٤ - **التدفق المغناطيسي** : هوعدد خطوط المجال المغناطيسي الموجودة في الدائرة المغناطيسية و يتم قياسه بالويبر (*Waber*) .
يحافظ التدفق المغناطيسي على قيمته خلال أي جزء مستقيم في الدائرة المغناطيسية فهو مماثل للتيار في الدوائر الكهربائية .
٥ - **شدة المجال المغناطيسي** H : يمكن حسابها في الدوائر المغناطيسية البسيطة بتطبيق **نظرية أمبير** و التي تقول بأن التكامل الخطي لشدة المجال المغناطيسي H حول مسار مغلق يساوي التيار الكلي داخل هذا المسار .

$$\oint \vec{H}.\vec{dl} = \sum I \qquad (1.1)$$



الشكل ٥,١ : توضيح نظرية أمبير

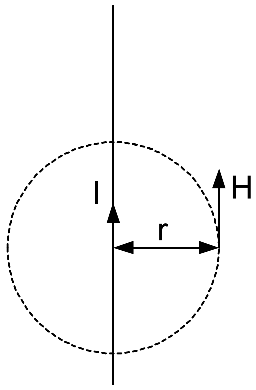
إذا كان المسار هو خط من خطوط المجال المغناطيسي بحيث $\overrightarrow{H}$ مماس على هذا المسار يبسط قانون أمبير إلى

$$\oint H.dl = \sum I$$

زيادة على هذاإذا كانت الدائرة مكونة من أجزاء متطابقة يكتب قانون أمبير على النحو التالي :

$$\sum H.l = \sum I$$

مثال١: تعيين شدة المجال المغناطيسي حول موصل يمر فيه تيار كهربائي:



الشكل ٦,١ : تعيين شدة المجال حول موصل يمر فيه تيار

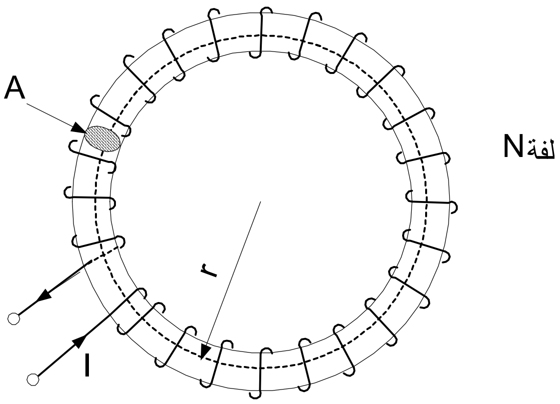
$$H.l = I$$

l هو محيط الدائرة نصف قطرها r ، $l = 2\pi r$ إذا :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{A/m})$$

تتعلق H بطول المسار المغناطيسي l و بالمصدر المغناطيسي (مغناطيس كهربائي أو مغناطيس دائم)

مثال 2 : عندما يمر تيار خلال ملف له N لفة ملفوفة على قلب حديدي دائري يكون المجال المغناطيسي محصورا في المادة الحديدية ، المجال المغناطيسي خارجها و يسمى بالمجال المتسرب الذي غالبا ما يكون مهملا .



الشكل ٧,١: شدة المجال لمغناطيس كهربائي على شكل حلقة

الشكل يبين حلقة حديدية ملفوف عليها ملف عدد لفاته N و يمر فيه تيار I ، ليكن مسار مغناطيسي دائري ومتوسط نصف قطره r ، شدة المجال المغناطيسي على هذا المسار هي H و من قانون أمبير :

$$\sum H.l = \sum I$$

التيارات داخل المسار المغلق هى NI و طول المسار المغناطيسي هو محيط دائرة نصف قطرها r أي $l = 2\pi r$ لذا نكتب قانون أمبير على النحو التالي :

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \quad \text{أو} \quad Hl = NI$$

يسمى المقدار NI القوة الدافعة المغناطيسية وحدتها عدد اللفات بالأمبير .

كما نلاحظ فإن شدة المجال المغناطيسي هي القوة الدافعة المغناطيسية خلال وحدة طول الدائرة المغناطيسية . Hl هو فرق الجهد المغناطيسي .

العلاقة $H = \frac{NI}{l}$ تبين أن شدة المجال المغناطيسي غير متعلقة بنوعية مادة القلب الحديدي وإنما بعدد لفات الملف N ، تيار الاستثارة I و الطول المتوسط للمادة المتكون منها هذا القلب الحديدي .

٦ - **كثافة التدفق المغناطيسي (أو الحث المغناطيسي)** B : هي كمية التدفق المغناطيسي Φ التي تعبر مساحة معينة A تكون عمودية على خطوط المجال المغناطيسي أي أن:

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad (٢,١)$$

وحدتها $\frac{Wb}{m^2}$ أو $Tesla$

كما يمكن القول أيضا أن الشدة H للمجال المغناطيسي أينما وجد تنتج كثافة تدفق مغناطيسي B التي تمثل التأثيرات الحساسة ، غالبا ما تكون على شكل ميكانيكي كقوة لابلاس و العزم الكهرومغناطيسي و العلاقة التي تربطها هي :

$$B = \mu H \qquad (٣,١)$$

و التي تبين أن كثافة التدفق المغناطيسي متعلقة بشدة المجال و بالوسط المتواجد فيه (حديد أو فراغ) .

تسمى μ النفاذية المغناطيسية و هي خاصية كل وسط به مجال مغناطيسي.

B و H متناسبان في الهواء و في الفراغ حسب القانون : $B = \mu_0 H$ حيث $\mu_0 = 4\Pi x 10^{-7}\ H/m$ **معامل** نافذية الفراغ أو النفاذية المطلقة و يكون منحنى الخاصية المغناطيسية $B = f(H)$ خطا مستقيما .

تقوى كثافة التدفق المغناطيسي في الأوساط الحديدية المغناطيسية طبقا للعلاقة :

$$B = \mu_r \mu_0 H \qquad (٤,١)$$

حيث μ_r هي معامل النفاذية النسبي للمادة.

$\mu_r = 1$ لأي وسط غير مغناطيسي كالفراغ ، الموصلات (النحاس ، الأليمينيوم) ، العوازل.

تتغير μ_r بالنسبة للمواد الحديدية المغناطيسية كالحديد ، كوبالت ، نيكول من بضع المئات إلى بضع الألوف فهي بالنسبة للمواد المستخدمة في الآلات الكهربائية ما بين 2000 و 6000 .

قيمة كبيرة للنفاذية النسبية μ_r تعني أن قيمة صغيرة للتيار تنتج كثافة تدفق مغناطيسي عالية .

لكل مادة تتعلق μ_r بشدة المجال H بسبب ظاهرة التشبع فمنحنى الخاصية المغناطيسة $B = f(H)$ غير خطي .

μ_r تكون ثابة إلا للمواد غير المتشبعة .

٧ - **المانعة (أو المقاومة) المغناطيسية R_m** : تعرف بأنها النسبة ما بين القوة الدافعة المغناطيسية NI والتدفق المغناطيسي Φ :

$$R_m = \frac{NI}{\Phi} \qquad (٥,١)$$

و تعبر هذه العلاقة عن قانون أوم للدائرة المغناطيسية و لمسار مغناطيسي طوله l و يمكن كتابتها أيضا على الشكل التالي :

$$R_m = \frac{NI}{\Phi} = \frac{NI}{BH} = \frac{NI}{\mu HA} = \frac{l}{\mu A}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \qquad (٦,١)$$

هي القاومة المغناطيسية لدائرة مغناطيسية طولها l ومساحة مقطعها A و نفاذية وسطها $\mu = \mu_r \mu_0$ ،
وحدتها $\frac{A.t}{Wb}$ أو $(henry)^{-1}$ ، R_m مماثلة للمقاومة $R = \frac{l}{\sigma A}$ في الدائرة الكهربائية بحيث :

- كلاهما متعلقة بالطول l و مساحة المقطع A
- تعوض الناقلية σ بالنفاذية μ
- تستعمل نفس قوانين التجميع :

- المقاومة المغناطيسية المكافئة لعدة مقاومات مغناطيسة على التوالي تساوي مجموع هذه المقاومات :

$$R_{meq} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \cdots\cdots \qquad (٧,١)$$

- المقاومات المغناطيسية على التوازي تكافئها مقاومة مغناطيسية حسب القاعدة هذه :

$$\frac{1}{R_{meq}} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} + \frac{1}{R_{m3}} + \cdots\cdots \qquad (٨,١)$$

يمكن إعادة كتابة قانون أمبير $\sum H.l = \sum NI$ مع إظهار الآن التدفق المغناطيسي Φ :

$$H_1 l_1 = \frac{B_1}{\mu_1} l_1 = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} \cdot \Phi_1 = R_{m1} \cdot \Phi_1$$

لذا لأي دائرة مغناطيسية مغلقة :

$$\sum R_m \cdot \Phi = \sum NI \qquad (٩,١)$$

حيث R_m هي المقاومة المغناطيسية لأي جزء من الدائرة المغناطيسية .

٨- الدائرة المغناطيسية المكافئة

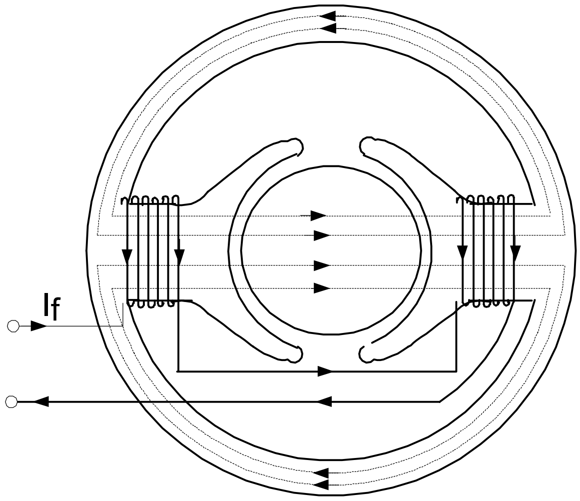
كما سبق ذكره ينتج مرور تيار كهربائي في ملف مكون من موصل ملفوف حول قلب حديدي مجالا مغناطيسيا في هذا القلب . هذا مماثل إلى حد كبير بالجهد الذي إذا ما سلط على دائرة كهربائية ينتج مرور تيار كهربائي . يمكن إذا تعريف دائرة مغناطيسية تتحكم في أدائها قوانين مماثلة لتلك التي تتحكم في الدائرة الكهربائية :الدائرة المغناطيسة هي عبارة عن مسارات يمر فيها التدفق المغناطيسي ، تماما ، كما أن الدائرة الكهربائية تنشئ مسارات لمرور التيار الكهربائي .تستخدم الدوائر المغناطيسة في المحولات و الآلات الكهربائية .

القوة الدافعة المغناطيسية NI تنتج تدفقا مغناطيسيا Φ ضد مقاومة مغناطيسية R_m حسب قانون:

$$NI = \Phi R_m$$

الدائرة المغناطيسية التي تحتوي على ثغرة هوائية :

في الآلات الكهربائية يكون العضو الدائر معزولا فيزيائيا عن العضو الثابت بالثغرة الهوائية كما هو مبين في الشكل(٨,١) :



الشكل ٨,١: آلة التيار المستمر

هذه الدائرة التي لها وسطان (الأقطاب من الحديد و الثغرة الهوائية) تسمى بالدائرة المغناطيسية المركبة .
في هذه الدائرة نمثل زيادة على القوة الدافعة المغناطيسية NI مقاومتين :

- في الحديد $R_c = \dfrac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c}$
- في الثغرة الهوائية $R_g = \dfrac{l_g}{\mu_0 A_g}$

يعطى التدفق المغناطيسي بالعلاقة : $\Phi = \dfrac{NI}{R_c + R_g}$ حيث إن $NI = H_c l_c + H_g l_g$ مع العلم أن l_c هو طول المسار المغناطيسي المتوسط في القلب الحديدي و l_g هو طول الثغرة الهوائية .

كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد : $B_c = \dfrac{\Phi}{A_c}$

كثافة التدفق المغناطيسي في الهواء : $B_g = \dfrac{\Phi}{A_g}$

نفترض : $A_c \cong A_g$ و بالتالي نتحصل على العلاقة : $B_g = B_c = \dfrac{\Phi}{A_c}$

٩ - مقارنة بين الدائرة الكهربائية و الدائرة المغناطيسية

الدائرة الكهربائية	الدائرة المغناطيسية
• القوة الدافعةالكهربائية E الوحدة($Volt$) • التيار الكهربائي $I=\frac{V}{R}$ الوحدة(A) • المقاومة الكهربائية $R=\frac{l}{\sigma A}$ الوحدة (Ω) • كثافةالتيار $J=\frac{I}{A}$ الوحدة ($\frac{A}{m^2}$)	• القوة الدافعةالمغناطيسية($F=NI$) الوحدة ($A\cdot t$) • التدفق المغناطيسي $\Phi=\frac{NI}{R_m}$ الوحدة ($Waber$) • المقاومة المغناطيسية $R_m=\frac{l}{\mu A}$ الوحدة($henry^{-1}$) • كثافة المغناطيسي $B=\frac{\Phi}{A}$ الوحدة($Tesla$)

إن قوانين أوم و كرشوف المغناطيسية هي إمتداد لكتابة مماثلة لقوانين أوم و كرشوف الكهربائية . هذه المشابهة وإن كانت ظاهرية ، في الواقع الفيزيائي توجد عدة فروق يمكن تلخيصها كالآتي :

• لا يوجد هناك مرور حقيقي للمقادير المغناطيسية : التدفق المغناطيسي موجود في القلب الحديدي نتيجة للتغير في تركيبة المادة الحديدية تحت ضغط خارجي و ليس كقياس لتنقل شحنات أو مادة في القلب كما هو الحال في الدائرة الكهربائية .

• لايمكن التفريق بين الملف و العضو الحديدي المركب عليه بينما ممكن أن نضع بطارية و مقاومة بجانب بعضهما البعض مثلا .

• حدود الدائرة المغناطيسية تكمن حسب مقاربة أولية في حدود الحديد و الثغرة الهوائية .

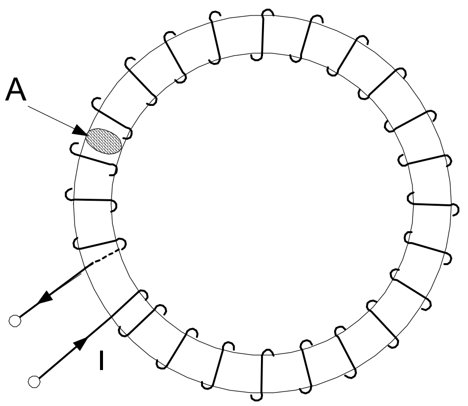
• المقاومة المغناطيسية غير معرفة إلا إذا كانت النفاذية معرفة و ثابتة ، إذا إلا في الأوساط غير المشبعة فقط بينما المقاومة الكهربائية ثابتة عند درجة الحرارة الواحدة .

• لكي يمر تيار كهربائي في الدائرة الكهربائية لابد من استهلاك مستمر للطاقة ، أما في الدائرة المغناطيسية فإننا نحتاج الطاقة فقط حتى يحدث تدفق للفيض المغناطيسي .

•يمر التيار الكهربائي في أسلاك دون حدوث تسرب له بينما في الدائرة المغناطيسية يحدث تسرب للفيض المغناطيسي في الهواء . معنى هذا ليس هناك عازل مغناطيسي مثلما هو موجودعازل كهربائي .

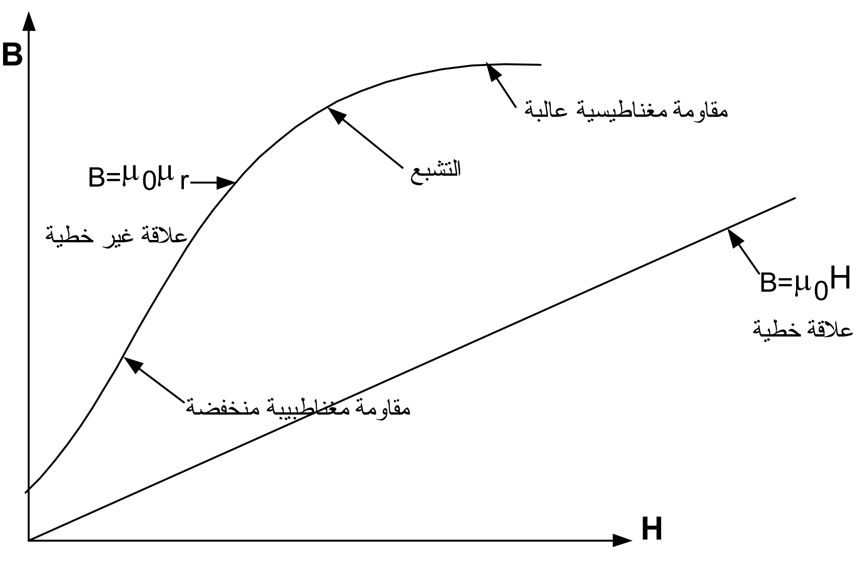
• ليس معنى أن المادة جيدة التوصيل للكهرباء أنها أيضا مادة مغناطيسية فأحسن المواد توصيلا للكهرباء مثل الفضة و النحاس و الألمنيوم مواد غير مغناطيسية .

١٠ - منحنى التمغنط :



الشكل ٩،١ : دائرة مغناطيسية على شكل حلقة

الشكل ٩،١ يبين دائرة مغناطيسية بسيطة ، قلبها الحديدي على شكل حلقة و ملفوف عليه ملف له N لفة.



الشكل ١٠،١ منحنى التمغنط

إذا تزايدت شدة المجال المغناطيسي H بزيادة التيار I الذي يمر في الملف فإن كثافة التدفق المغناطيسي B تتغير على النحو التالي :

تزيد كثافة التدفق المغناطيسي B تقريبا خطيا في بداية المنحنى الذي تكون فيه شدة المجال المغناطيسي H منخفضة بينما عند القيم العالية لشدة المجال تغير الكثافة يصبح غير خطي بسبب ظاهرة تشبع الحديد ، منحنى $B = f(H)$ يسمى منحنى التمغنط .

المقاومة المغناطيسية R_m للمسار المغناطيسي تتعلق بكثافة التدفق المغناطيسي B فهي تكون ضعيفة عندما تكون الكثافة ضعيفة و عالية عندما تكون الكثافة عالية .

في الوسط الهوائي يكون منحنى التمغنط خطا مستقيما .

١١ - المفاقيد الحديدية :

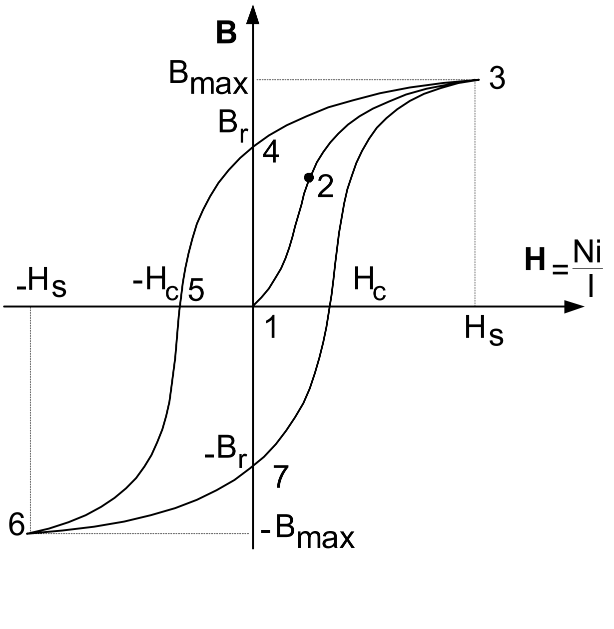
تنتج المفاقيد الحديدية تحت تأثير مغناطيسي دوري عن سببين مختلفين :

(أ) التخلف المغناطيسي أو هستريسيس (كلمة إغريقية تعني أن المادة الحديدية تحتفظ بما كانت عليه في الحالة السابقة) .

(ب) التيارات الإعصارية أو الدوامة .

١،١١ - التخلف المغناطيسي :

في الدائرة المغناطيسية المبينة في الشكل (١،٩) نفترض أن القلب الحديدي لم يكن أصلا ممغنطا أي $B = 0$ عند $H = 0$ (أو $I = 0$) . فإذا زادت شدة المجال الآن نتيجة لزيادة التيار I ،كثافة التدفق المغناطيسي ستتغير حسب المنحنى $1 - 2$ في الشكل (١١،١) .



الشكل ١١،١ : حلقة هستريزيس

النقطة 2 تناظر قيمة معينة لشدة المجال H_1 مثلا (نتيجة لمرور التيار I_1 في الملف) إذا زودنا شدة المجال فوق هذا نحصل على القيمة H_s ، يستمر المنحنى حتى النقطة 3 . عندما يحدث التشبع ، تصل كثافة التدفق المغناطيسي إلى قيمتها العظمى B_m : أي زيادة إضافية الآن في التيار خلال الملف (أي زيادة H) ما ينتج عنها إلا زيادة قليلة في كثافة التدفق B .

بعد هذا إذا خفضنا H للصفر بتخفيض التيار للصفر سيأخذ المنحنى مسارا مختلفا 3 -4 وعندما تكون $H = 0$ تحتفظ المادة بكثافة تدفق تسمى **بكثافة التدفق المغناطيسي المتبقي** B_r ، هذه الكثافة هي التي تسمح بتكوين المغناطيس الدائم . فإذا نزعنا الملف عن القلب الحديدي ، سيحتفظ هذا الأخير بخصائص مغناطيسية تعينها كثافة التدفق المتبقي .

إذا عكسنا التيار الآن ($-H$) ستتناقص B مع زيادة التيار إلى أن تصل إلى الصفر ($B = 0$) عندما تصل شدة المجال إلى القيمة $-H_c$ والمنحنى يأخذ المسار 4 -5 ، شدة المجال هذه $-H_c$ اللازمة لإزالة كثافة التدفق تسمى **بشدة المجال القهري** .

عند تزايد شدة المجال في الاتجاه المعاكس حتى تصل إلى التشبع ثم تعكس مرة ثانية و تخفض إلى الصفر المنحنى يأخذ المسار 5 - 6 - 7 و إذا تزايدت شدة المجال الآن في الاتجاه المجب ($+H$) المنحنى يأخذ المسار 7 - 3 . المنحنى الكلي 3 -4 -5 -6 -7 -3 يسمى **بمنحنى التخلف المغناطيسي أو حلقة هستريسيس** للمواد الحديدية المغناطيسية . نلاحظ تأخر كثافة التدفق B عن شدة المجال H خلال الرسم البياني الكلي للمنحنى : عندما تكون $H = 0$ ، $B \neq 0$ لكن تبدأ في التناقص ، بعد هذا تكون H قد مرت بالصفر و أصبحت تساوي $-H_c$ حينئذ تصل B في النهاية إلى الصفر .

- مفاقيد التخلف المغناطيسي :

نتحصل على منحنى التخلف المغناطيسي بتغير التيار قليلا عبر الملف عند دورة واحدة . عندما يتغير التيار في دورة واحدة خلال مجال زمني معين تتدفق الطاقة من المصدر إلى الملف الملفوف على القلب الحديدي وفي مجال زمني آخر ترجع الطاقة إلى المصدر ، إلا أنه يمكن الملاحظة أن الطاقة التي يسحبها الملف من المصدر أكبر من تلك التي يعيدها إليه . إذا خلال تغير التيار المغنط I (و بالتالي H) خلال دورة واحدة ، هناك تدفق صاف للطاقة من المصدر إلى مجموعة الملف و القلب . هذه الطاقة تظهر على شكل حرارة في القلب . هذا الفقد للقدرة في القلب نتيجة للتخلف المغناطيسي يسمى بفقد التخلف المغناطيسي . كما يمكن تبيان أن مساحة منحنى التخلف متناسبة مع فقد التخلف المغناطيسي و يستهلك الدوران في حلقة التخلف المغناطيسي طاقة تتناسب مع المساحة المحاطة بهده الحلقة . و هذه الطاقة تسمى فقد التخلف المغناطيسي . عند مغنطة القلب الحديدي باستخدام التيار المتغير يحدث فقد في القدرة (يسمى فقد

التخلف المغناطيسي) بطريقة دورية مما يتسبب في رفع درجة حرارةالقلب الحديدي . لهذا فإن القلب الحديدي للآلات التي تعمل بالتيار المتغير تستخدم صفائح الحديد المطاوع و صفائح الصلب السيليكوني التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة صغيرة ، و ذلك للتقليل من فقد التخلف المغناطيسي .

من الصعب جدا تقييم مساحة حلقة التخلف المغناطيسي لأن خاصية $B = f(H)$ غير خطية و متعددة القيم و لا توجد علاقة رياضية بسيطة تصف المنحنى ، إلا أن بالنسبة للمواد المغناطيسية يمكن استعمال العلاقة التجريبية التالية : $p_h = k_h V B_m^n f$ حيث k_h ثابت متعلق بالمادة المغناطيسية و حجم القلب الحديدي ، V هو حجم القلب الحديدي ، B_m هي كثافة التدفق المغناطيسي العظمى ، n عدد يتغير في المجال 1.5 إلى 2.5 .

للتقليل من مفاقيد التخلف المغناطيسي تستخدم المواد المغناطيسية ذات حلقة تخلف مغناطيسي ضيقة .

٢,١١ - مفاقيد التيارات الإعصارية

يحدث نوع آخر لفقد الطاقة في القلب الحديدي عندما تتغير كثافة التدفق المغناطيسي بسرعة في القلب . تتولد قوة دافعة كهربائية داخل هذا القلب بسبب التغير الزمني للتدفق المغناطيسي ، ينشأ مرور تيار في شكل دوامات يسمى بالتيار الدوامي أو الإعصاري i_e ، و بما أن القلب الحديدي له مقاومة كهربائية R يؤدي مرور التيار الإعصاري i_e إلى فقد في القدرة قيمته $i_e^2 R$ حيث R هي مقاومة المسار و بظهر هذا الفقد على شكل حرارة في القلب .

للتقليل من التيارات الإعصارية في المادة التي تحمل تدفقاً مغناطيسياً متغيراً ، يلزم جعل مقاومة القلب الكهربائية كبيرة فتقل شدة التيار الإعصاري و بالتالي يقل فقد التيارات الإعصارية . ولهذا الغرض تستعمل طريقتان :

- تستخدم المواد المغناطيسية ذات مقاومة نوعية عالية ، إضافة قيمة مئوية حوالي (4%) من مادة السيليكون للحديد تزيد في مقاومته النوعية زيادة ملحوظة .
- يستخدم قلب مكون من صفائح الصلب الرقيقة و المعزولة عن بعضها البعض حيث تكون التيارات الإعصارية محصورة في مساحات ضيقة يقل فيها تأثيرها على الخصائص المغناطيسية .

فقد التيارات الإعصارية يعطى بالعلاقة التالية : $p_e = k_e B_m^2 f^2 t^3$ بحيث k_e ثابت يتعلق بنوع المادة و سمك صفائحها ، B_m القيمة القصوى لكثافة التدفق المغناطيسي ، f هو التردد ، t هو سمك الصفائح و يكون في الآلات الكهربائية ما بين 0.5 و $5mm$.

ملاحظة :

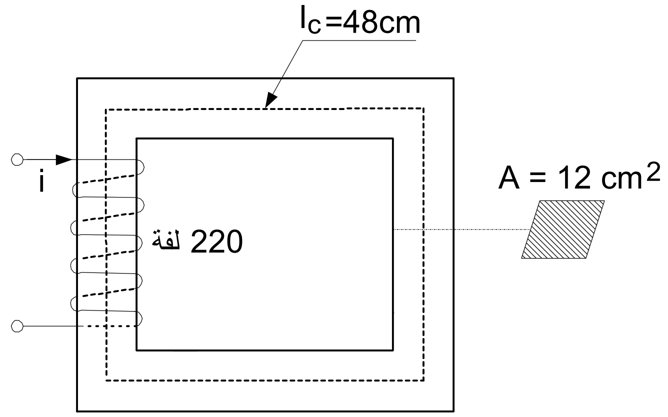
فقد التخلف المغناطيسي وفقد التيارات الإعصارية ، كلاهما يسبب ارتفاع درجة حرارة القلب الحديدي ، لذا يجب أخذهما بعين الإعتبار عند تصميم أي آلة كهربائية أو محول ، و ما دام يحدثان داخل المادة المكون منها القلب الحديدي ، تجمع عادة مع بعضها ويطلق عليها اسم المفقودات الحديدية

و يرمز إليها بـــ P_c لذا فإن : $P_c = p_h + p_e$

١٢ - أسئلة محلولة في الدوائر المغناطيسية :

السؤال الأول :

دائرة مغناطيسية مكونة من قلب حديدي مستطيل الشكل ، طول مساره المتوسطي يساوي $48cm$ ومساحة مقطعة $12cm^2$ ملفوف عليه ملف عدد لفاته 220 . النفاذية النسبية للحديد تساوي 200 و النفاذية المطلقة للفراغ $\mu_0 = 4\pi X 10^{-7}\ H/m$.



شكل١٢,١ : ملف حول قلب مستطيل الشكل

١ - احسب :

١,١ - المقاومة المغناطيسة للقلب الحديدي ، R_c

٢,١ - شدة التيار اللازم I_1 لتوليد تدفق مغناطيسي كثافته $1.1T$

٢ - إذا أحدثت ثغرة هوائية في القلب الحديدي طولها $1cm$ و بافتراض عدم تقوس خطوط المجال فيها ، احسب :

1.2 المقاومة المغناطيسية الكلية في الحديد و في الهواء R_{mtotal}

2.2 الشدة الجديدة I_2 للتيار اللازم لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد .

الحل :

1.1 المقاومة المغناطيسية في الحديد : $R_{c1}=\dfrac{l_{c1}}{\mu_r\mu_0 A_c}$

$$=\frac{0.48}{200x4\pi x10^{-7}x12x10^{-4}}=1591549A.t/Wb$$

٢،١ شدة التيار اللازم لتوليد كثافة التدفق المغناطيسي $B_c=1.1T$ في الحديد ، تعطى بقانون أوم للدوائر المغناطيسية :

$$NI_1=\Phi\cdot R_{c1}\Rightarrow I_1=\frac{\Phi\cdot R_{c1}}{N}=\frac{B_c\cdot A_c\cdot R_{c1}}{N}$$

$$=\frac{1.1x12x10^{-4}x1591549}{220}=9.55A$$

2.1 المقاومة المغناطيسة الجديدة في الحديد :

$$R_{c2}=\frac{l_{c2}}{\mu_r\cdot\mu_0\cdot A_c}$$

حيث l_{c2} هو طول المسار المغناطيسي الجديد في الحديد $l_{c2}=0.48-0.01=0.47m$ إذا :

$$R_{c2}=\frac{0.47}{200x4\pi x10^{-7}x12x10^{-4}}$$

$$=1558392A\cdot t/Wb$$

- المقاومة المغناطيسيةفي الثغرة الهوائية :

$$R_g=\frac{l_g}{\mu_0\cdot A_g}\Rightarrow R_g=\frac{l_g}{\mu_0\cdot A_c}$$

$A_g=A_c$ لأن تقوس خطوط المجال المغناطيسي في الثغرة الهوائية مهمل

l_g هو طول الثغرة الهوائية و يساوي $0.01m$

$$R_g=\frac{0.01}{4\pi x10^{-7}x12x10^{-4}}$$

$$=6631456A\cdot t/Wb$$

- المقاومة المغناطيسية الكلية في الحديد وفي الهواء :

$$R_{total}=R_{c2}+R_g$$

$$=1558392+6631456$$

$$=8189848A\cdot t/Wb$$

2.2 شدة التيار الجديد اللازم لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد :

$$I_2 = \frac{\Phi \cdot R_{total}}{N}$$

$$= \frac{B_c \cdot A_c \cdot R_{total}}{N}$$

$$= \frac{1.1x12x10^{-4}x8189848}{220} = 49.14A$$

ملاحظة :

- القوة الدافعة المغناطيسية في الحالة الأولى :

$$N\,I_1 = 220x9.55$$

$$= 2101A \cdot t$$

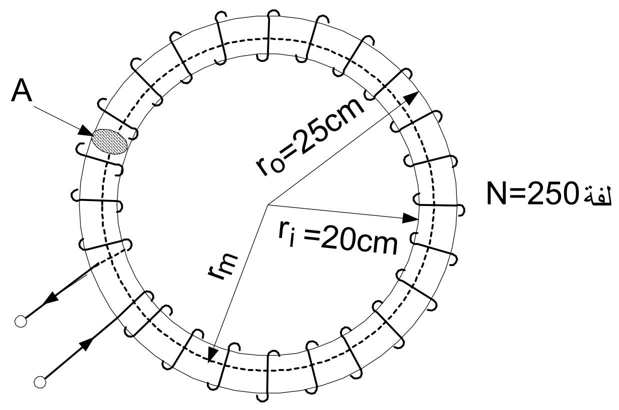
- القوة الدافعة المغناطيسية في الحالة الثانية :

$$N\,I_2 = 220x49.14$$

$$= 10811A \cdot t$$

يمكننا الملاحظة إذا أن لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي يلزمنا قوة دافعة مغناطيسية أكبر و جلها تضيع في الثغرة الهوائية .

السؤال الثاني :



شكل ١٣,١ : ملف حول حلقة .

لملف 250 لفة ملفوفة على حلقة مصنوعة من الصلب الممزوج بالسيليكون كما هو مبين في الشكل . نصف القطر الداخلي $r_i = 20cm$ ، نصف القطر الخارجي $r_o = 25cm$. للقلب الحديدي مساحة مقطع دائرية .

إذا كانت شدة التيار الذي يمر في الملف تساوي $2.5A$ ، أوجد :

1- كثافة التدفق المغناطيسي عند نصف القطر المتوسط للقلب الحديدي .

2- محاثة الملف بافتراض أن كثافة التدفق المغناطيسي منتظمة و تساوي قيمتها عند نصف القطر المتوسط .

الحل :

1- تعطى شدة المجال المغناطيسي H عند نصف القطر المتوسط r_m بالعلاقة التالية :

$$H = \frac{NI}{l}$$

حيث N هو عدد لفات الملف، $N = 250$ ، l هو طول المسار المغناطيسي المتوسط وهو محيط لدائرة نصف قطرها r_m ، $l = 2\pi r_m$ $r_m = \frac{1}{2}(r_i + r_o) = \frac{1}{2}(0.25 + 0.20) = 0.225m$

لذا $H = \frac{250x2.5}{2\pi x0.225} = 442.3A \cdot t/m$ ، من منحنى المغنطة للصلب الممزوج بالسيليكون كثافة التدفق المغناطيسي B المناظرة لشدة المجال $H = 442.3A \cdot t/m$ هي $B = 1.225T$.

2- محاثة الملف $L = \frac{N\Phi}{I}$ ، $\Phi = B \cdot A_c$ ، $A_c = \pi r^2$ هي المساحة الدائرية لمقطع الحلقة و r نصف قطر قلب الحلقة و يساوي $r = \frac{1}{2}(r_o - r_i) = \frac{1}{2}(0.25 - 0.20) = 0.025m$ $A_c = \pi x(0.025)^2 = 625\pi x10^{-6}\ m^2$

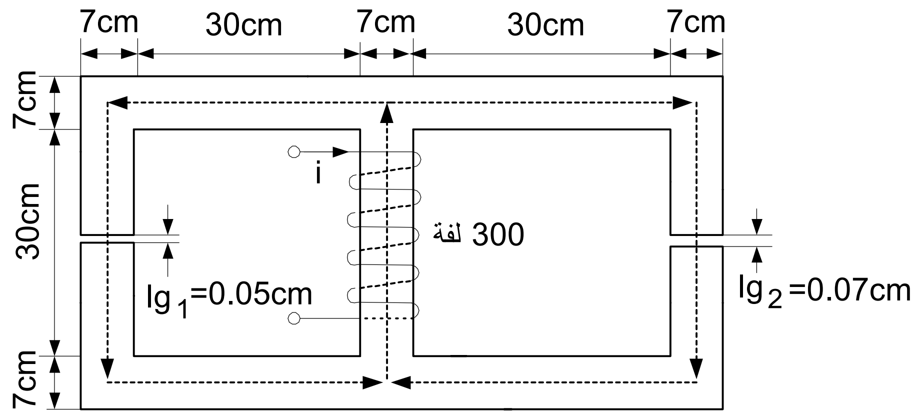
، $\Phi = 1.225x625\pi x10^{-6} = 24.04x10^{-4}Wb$

لذاتكون محاثة الملف : $L = \frac{250x24.04x10^{-4}}{2.5} = 0.2404H = 240.4mH$

السؤال الثالث :

الشكل يبين قلب حديدي ، له نفاذية نسبية $\mu_r = 2000$ و أبعاده كما هي مبينة في الشكل ، عمق القلب يساوي $7cm$ ، الثغرة الهوائية لها على اليسار طول $0.05cm$ و على اليمين طول $0.07cm$ ، بسبب تقوس خطوط المجال المغناطيسي تزيد مساحة مقطع الثغرتين الفعالة بخمسة في المائة (5%) عن مساحة القلب الحديدي .

يلف ملف بعدد لفات $N = 300$ على العمود الأوسط للقلب الحديدي ، إذا كان التيار الممغنط الذي يمر في هذا الملف له قيمة $I = 1A$:



شكل ١٤,١ : دائرة مغناطيسية مركبة .

1- كم قيمة التدفق المغناطيسي التي يتم توليدها في العمود الأيسر ، الأوسط ، الأيمن للقلب الحديدي -

2- ما هي كثافة التدفق المغناطيسي في كل ثغرة هوائية .

ألحل :

١ - المقاومة المغناطيسية للعمود الأوسط :

$$R_3 = \frac{l_3}{\mu_r \mu_0 A_c}$$

$$= \frac{(30+3.5+3.5)x10^{-2}}{2000x4\pi x10^{-7}x(7x7)x10^{-4}} = 30044 A \cdot t / Wb$$

المقاومة المغناطيسية للأطراف الأخرى ماعدا الثغرتين الهوائيتين :

$$R_1 = R_2 = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A_c}$$

$$= \frac{(3.5+30+3.5+3.5+30+3.5+3.5+30+3.5)x10^{-2}}{2000x4\pi x10^{-7}x49x10^{-4}}$$

$$= 90134 A \cdot t / Wb$$

المقاومة المغناطيسية للثغرة الهوائية اليسرى :

$$R_{g1} = \frac{l_{g1}}{\mu_0 A_g}$$

$$= \frac{0.05x10^{-2}}{4\pi x10^{-7}x(1.05x49x10^{-4})}$$

$$= 77335 A \cdot t / Wb$$

المقاومة المغناطيسية للثغرة الهوائية اليمنى :

$$R_{g2} = \frac{l_{g2}}{\mu_0 A_g}$$

$$= \frac{0.07x10^{-2}}{4\pi x10^{-7}x(1.05x49x10^{-4})}$$

$$= 108269 A\cdot t/Wb$$

المقاومة المغناطيسية المكافئة للمقاومة R_1 على التوالي مع المقاومة R_{g1} هي R_4 :

$$R_4 = R_1 + R_{g1}$$

$$= 90134 + 77335$$

$$= 167469 A\cdot t/Wb$$

المقاومة المغناطيسية المكافئة للمقاومة R_2 على التوالي مع المقاومة R_{g2} هي R_5 :

$$R_5 = R_2 + R_{g2}$$

$$= 90134 + 108269$$

$$= 198403 A\cdot t/Wb$$

المقاومتان المغناطيسيتان R_4 و R_5 موصلتان على التوازي ، المقاومة المكافئة لهما هي R_6 و تكون لها القيمة التالية :

$$R_6 = \frac{R_4 x R_5}{R_4 + R_5}$$

$$R_6 = \frac{167469x198403}{167469 + 198403}$$

$$= 90814 A\cdot t/Wb$$

بعد ما تم تبسيط الدائرة المغناطيسية إلى الدائرة المكافئة التالية :

يكون التدفق المغناطيسي في العمود الأوسط :

$$\Phi = \frac{NI}{R_3 + R_6}$$

$$= \frac{300x1}{30044 + 90814}$$

$$= 2.5mWb \quad = 0.0025Wb$$

التدفق المغناطيسي في العمود الأيسر يعطى بنفس قاعدة تفرع التيار :

$$\Phi_1 = \Phi x \frac{R_5}{R_4 + R_5}$$

$$= 0.0025x \frac{198403}{167469 + 198403}$$

$$= 1.36x10^{-3} Wb$$

$$= 1.36 mWb$$

التدفق المغناطيسي في العمود الأيمن :

$$\Phi_2 = \Phi x \frac{R_4}{R_4 + R_5}$$

$$= 0.0025x \frac{167469}{167469 + 198403}$$

$$= 1.14x10^{-3} Wb$$

$$= 1.14 mWb$$

2-)

(أ) كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية اليسرى :

$$B_{g1} = \frac{\Phi_1}{A_g}$$

$$= \frac{1.36x10^{-3}}{1.05x49x10^{-4}}$$

$$= 0.264T$$

(ب) كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية اليمنى :

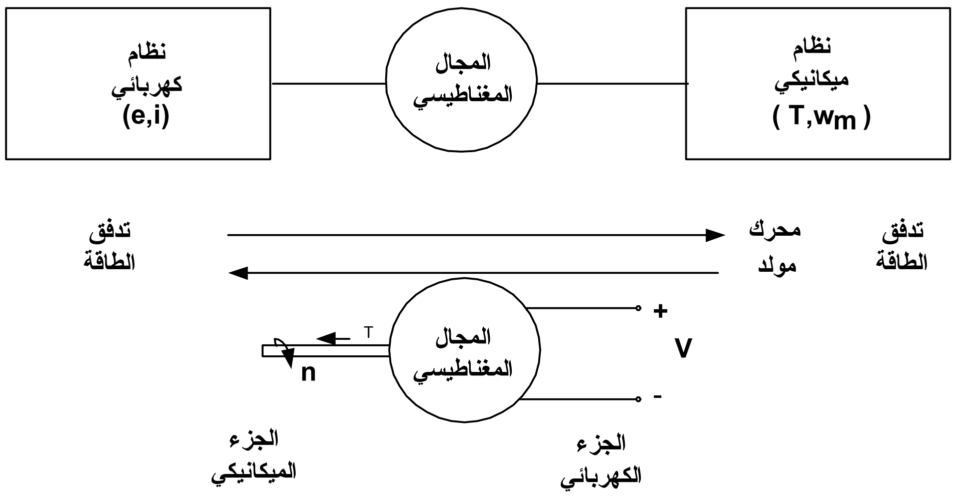
$$B_{g2} = \frac{\Phi_2}{A_g}$$

$$= \frac{1.14x10^{-3}}{1.05x49x10^{-4}} \qquad = 0.222T$$

٢،١ آلات التيار المستمر

مقدمة :

آلات التيار المستمر هي إما مولدات تحول الطاقة الميكانيكية عند الدخل إلى طاقة كهربائية ناتجة عن تيار مستمر عند الخرج و إما محركات تحول الطاقة الكهربائية من مصدر تيار مستمر عند الدخل إلى طاقة ميكانيكية عند الخرج . و بما أن أي آلة كهربائية يمكنها أن تحول الطاقة في أي اتجاه فالآلة الكهربائية قابلة للعمل كمولد أو كمحرك و تحويل الطاقة من شكل إلى آخر يتم عن طريق المجال المغناطيسي . الآلة الكهربائية هي إذا همزة وصل ما بين نظام كهربائي الممثل في الجهد (e) و التيار(i) ونظام ميكانيكي ممثل في العزم(T) والسرعة(n) ، فكما نلاحظ فإن النظامين مختلفان في طبيعتهما .



الشكل ١٥،١ : عملية تحويل الطاقة الكهروميكانيكية

في الآلات الكهربائية تحويل الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية أو العكس يتم عن طريق ظاهرتين كهرومغناطيسيتين :

- عندما يتحرك موصل كهربائي في مجال مغناطيسي ، يتولد داخله جهد و هذا مبدأ عمل المولدات
- عنما يمر تيار كهربائي في موصل موضوع داخل مجال مغناطيسي ، يتحرك الموصل نتيجة لقوة ميكانيكية (قوة كهرومغناطيسية) .

الشيء الذي تجدر الإشارة إليه هنا هو أن الظاهرتين تحصلان في آن واحد كلما حدث تحويل للطاقة من الشكل(١٥،١) الكهربائي إلى الميكانيكي أو العكس .

في عمل الآلة كمحرك ، النظام الكهربائي يمرر تيارا خلال الموصلات التي تكون موضوعة داخل مجال مغناطيسي ، تتولد في كل موصل من هذه الموصلات قوة ميكانيكية بحيث إذا كانت الموصلات محمولة على هيكل معدني قابل للدوران بحرية ، يتولد عزم كهرومغناطيسي يحاول دفع الهيكل للدوران بسرعة معينة و الآن زيادة على هذا يتولد جهد في الموصلات المتحركة يعاكس جهد المصدر للتقليل من التيار الذي يسحبه المحرك من هذا المصدر .

في عمل الآلة كمولد تنعكس العملية ، في هذه الحالة يدفع العضو الدائر للحركة بواسطة آلة ثانية (قد تكون محرك ديزل ، تربين بخارية أو حتى محرك كهربائي) يتولد إذا جهد في الموصلات التي يحملها العضو الدائر . إذا ما وصلنا الآن حمل كهربائي للملف المكون من هذه الموصلات سيمر تيار يعطي قدرة كهربائية للحمل ، و زيادة على هذا يتفاعل التيار الذي يمر في الموصلات مع المجال المغناطيسي فينتج عنه عزم معاكس لعزم الآلة الثانية المحركة .

يمكن الملاحظة سواء في عملية المحرك أو المولد ضرورة تواجد مجال مغناطيسي لتوليد العزم و الجهد .

في الشكل التوضيحي (١٥،١) لمغير طاقة دوار بدون مفاقيد ، تكون معادلة تغير الطاقة المناظرة هي :

$$T \cdot w_m = v \cdot i$$

حيث T هو العزم (N.m) و w_m السرعة الزاوية عند الدوران (radians/second) للطرف الميكانيكي و أيضا v هو الجهد (volt) و i هو التيار (amperes) للطرف الكهربائي . و تبين المعادلة التكافؤ ما بين القدرة الميكانيكية و الكهربائية و لكنها لاتعطي أي فكرة عن عملية تحويل الطاقة .

القوة الدافعة الكهربائية ، e :

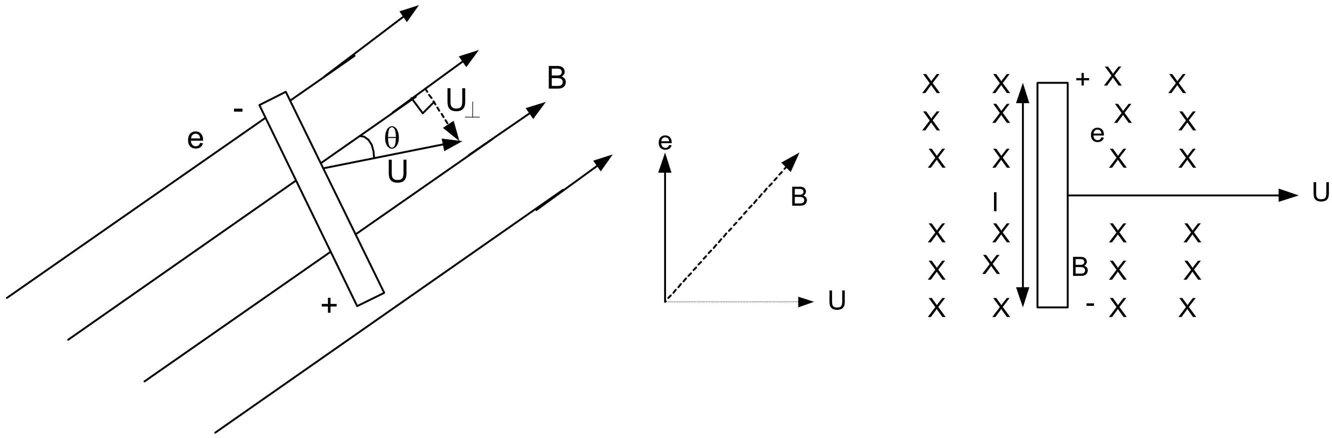
تعمل المولدات الكهربائية و التي تحول الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية على أساس قانون فاراداي الخاص بالكهرومغناطيسية التأثيرية ، و طبقا لهذا القانون فإنه حينما يقطع موصل خطوط المجال المغناطيسي أو حينما يكون التدفق المغناطيسي المخترق للدائرة الكهربائية متغيرا مع الزمن فإنه تتولد قوة دافعة كهربائية بالتأثير في الموصل أو الدائرة و هاتان الصورتان لقانون فاراداي يمكن صياغتهما رياضيا كالتالي :

$$e = Blu\sin\theta = Blu_{\perp} \qquad (١٠،١)$$

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) \qquad (١١،١)$$

المعادلة (١٠،١) تخص الشكل (١٦،١) حيث يتحرك موصل مستقيم طوله l في مجال مغناطيسي منتظم،

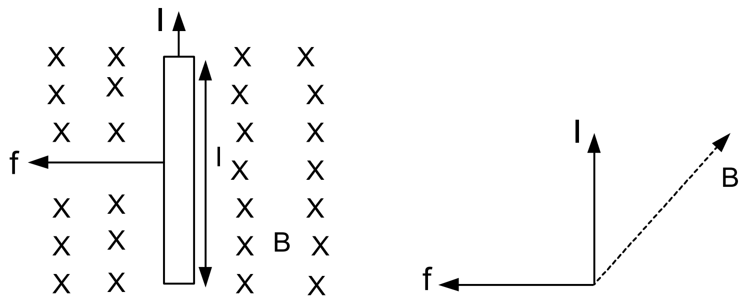
كثافته B و قاطعا خطوط المجال بزاوية قائمة و نلاحظ أن مركبة السرعة العمودية على اتجاه المجال هي التي يعتمد عليها في توليد الجهد التأثيري e التي تكون إشارته كما هو مبين في الشكل ، لاحظ أنه إذا كانت $\theta = 90^{\circ}$ فإن المعادلة (١٠,١) تصبح $e = Blu$.و تمثل المتساوية الأولى في المعادلة (١١,١) الحالة العامة لقانون فاراداي . أما المتساوية الثانية في المعادلة (١١,١) فهي مستنتجة من تعريف الحث المغناطيسي .



الشكل ١٦,١ : القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في موصل

في العلاقة $e = Blu$ تكون المقادير B ، l ، u متعامدة على بعضها البعض و يعطى اتجاه e بقاعدة اليد اليمنى لفلمنج (Fleming) .

القوة الكهرومغناطيسية ، f :



الشكل ١٧,١ : موصل حامل تيار فب مجال مغناطيسي

كما في الشكل (١٧,١) عند ما يمر تيار في موصل متواجد في مجال مغناطيسي يتحرك الموصل في اتجاه السهم . هذه الحركة سببها قوة ميكانيكية f عمودية على كل من التيار و المجال و تسمى بقوة لابلاس Laplace

و تعطى بالعلاقة التالية :

$$f = Bil\sin\theta \quad (\mathrm{N}) \qquad (١٢,١)$$

إذا كانت $\theta = \left(\vec{l},\vec{B}\right) = 90^{\circ}$ ، $\sin\theta = 1$ $\qquad f = Bil \quad (\mathrm{N})$

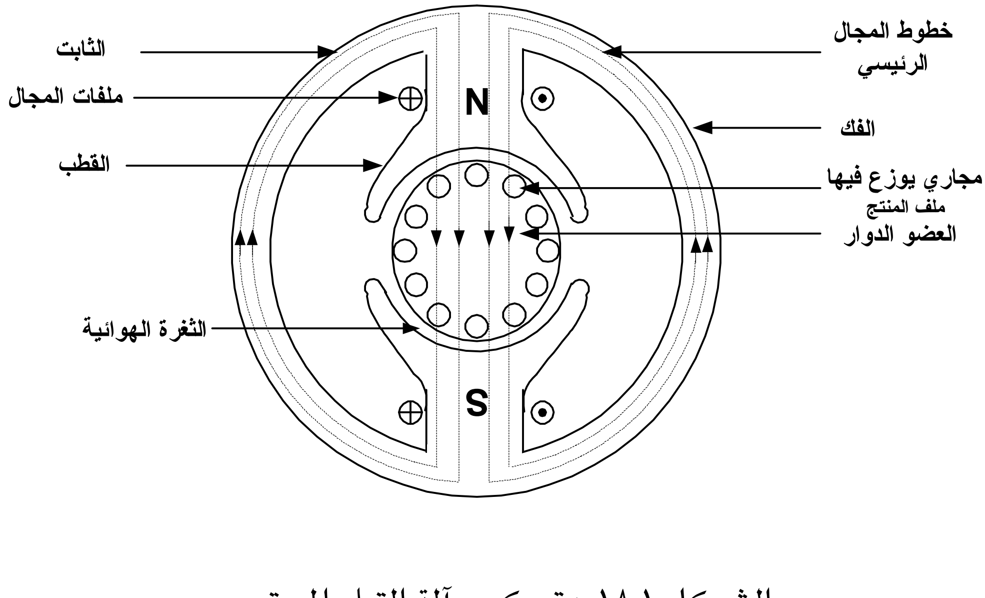
يعطى اتجاه القوة f بقاعدة اليد اليسرى لفلمنج .

طبعا هناك طرق أخرى يمكن تعيين بها e و f .

1- تركيب آلات التيار المستمر :

التنظيم العام لتركيب آلة التيار المستمر أصبح الآن مستقرا كلية . مهما اتلف مصممو آلات التيار المستمر فإن التركيب و أبعاد الآلة مماثلة من صانع لآخر . التغير الوحيد الذي يمكن أن يحصل هو في استعمال المواد المعدنية وخاصة المواد المغناطيسية منها و العوازل .

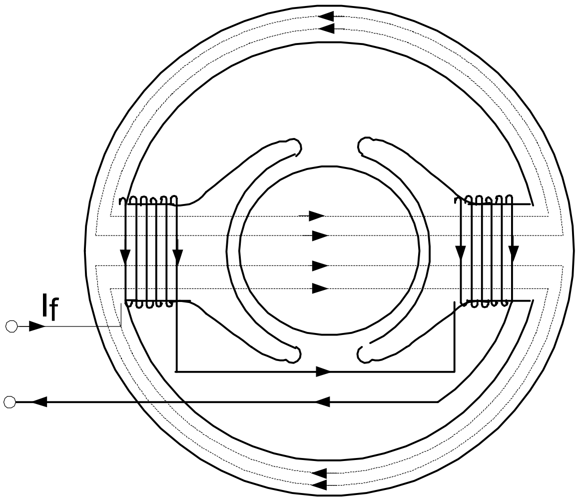
تحتوي آلات التيار المستمر على عنصرين أساسيين هما الثابت و العضو الدائر ، مفصولين بثغرة هوائية كما هو مبين في الشكل (١٨,١)، زيادة على عناصر أخرى كما سيأتي .



الشكل ١٨,١ : تركيب آلة التيار المستمر

1.1- العضو الثابت (stator): هذا الجزء من الآلة لا يتحرك و يكون عادة الهيكل الخارجي للآلة ، تركب عليه من الداخل أقطاب المجال بعدد زوجي و هي أقطاب بارزة لأنها ظاهرة على السطح الداخلي للثابت .وتحمل ملفات تسمى ملفات الاستثارة أو ملفات المجال لأن عندما يمر فيها تيار كهربائي تنتج المجال المغناطيسي المطلوب للآلة . هذه الملفات يجب أن تحتوي على نفس عدد اللفات و يمر فيها نفس تيار الاستثارة لذا توصل على التوالي كما أن كل ملف ملفوف على شكل حلقة في اتجاه متناوب لتحقيق

قطبية الآلة بتوالي أقطاب شمالية (N) و جنوبية (S) . تولد إذا ملفات الاستثارة المجال المغناطيسي الضروري للآلة ، قدرة الاستثارة تكون من 2 إلى 3% من القدرة الكلية و قد تصل إلى 5% للآلات الصغيرة . ملفات الاستثارة تكون إما مستقيمة و إما تأخذ شكل الفك، كما يمكن أن تلف على عدة مستويات أو متمركزة. بالرغم من أنه ليس من الضروري أن تصنع الأقطاب من صفائح الصلب نظرا لأن ملفات المجال تحمل تيارا مستمرا إلا أنها تصنع عادة من هذه الصفائح و ذلك ليسهل تجميعها وتركيبها مع ملفات المجال لكن يبقى من الضروري أن تصنع أوجه الأقطاب من صفائح الصلب و ذلك لقربها من ملفات عضو الاستنتاج و يتكون الثابت أيضا من الفك الذي يربط الأقطاب فيما بينها و يسمح برجوع خطوط القوى المغناطيسية للأقطاب .



الشكل ١٩،١ : ملفات المجال

2.1-**العضو الدائر أو عضو الاستنتاج** (rotor or armature): هذا الجزء من الآلة يكون حرا للدوران و عادة هو الجزء الداخلي للآلة و يتكون من عمود الإدارة مصنوع من الصلب و يركب عليه قلب أسطواني من صفائح الصلب الذي يوجد على سطحه الخارجي و على طوله مجارٍ توزع فيها و بصفة منتظمة ملفات تسمى ملفات المنتج أو ملفات الاستنتاج بكونها هي الملفات التي تتولد فيها القوة الدافعة الكهربائية . ما دام العضو الدائر هو الذي يحمل ملفات الاستنتاج فهو كذلك يسمى في بعض الأحيان عضو الاستنتاج أو المنتج . تدور هذه الأسطوانة بسرعة معينة بواسطة عمود الإدارة الذي يحملها و الذي ينقل إلى المولد القدرة الميكانيكية اللازمة لتحويلها إلى قدرة كهربائية . عمود الإدارة يحمل أيضا المبدل و تربينة التبريد كما هو الذي تسحب منه القدرة الميكانيكية التي يتم تحويلها من القدرة الكهربائية المغذية للمحرك .

العضو الثابت و العضو الدائر المفصولان بثغرة هوائية يشكلان معا الدائرة المغناطيسية للآلة . تخرج خطوط قوى المجال المغناطيسي من الأقطاب الشمالية على المحور الطولي و تمر على الثغرتين الهوائيتين عبر العضو الدائر و تدخل في الأقطاب الجنوبية لتنغلق على نفسها عبر الفك كما هو مبين في الشكل

3.1- **عضو التوحيد أو المبدل (commutator)**: يركب هذا العضو على عمود الإدارة أمام المنتج و يصنع من قطع النحاس الأحمر المسحوب و المعزولة عن بعضها البعض بالميكا من جهة و عن عمود الإدارة من جهة ثانية و تشكل أسطوانة فارغة تنزلق عليها الفرش الكربونية . توصل كل بداية و نهاية لملفات عضو الاستنتاج بقطعة من قطع المبدل بواسطة اللحام و ذلك حسب نوعية اللف . يوحد المبدل التيار المتردد في ملفات المنتج إلى تيار مستمر في دائرة الحمل الخارجية عبر الفرش .

4.1- **الفرش الكربونية و حاملها (brushes):**

1.4.1- **الفرش الكربونية** :هي قطع من الكربون موضوعة على السطح الخارجي للمبدل و يؤخذ منها التيار المستمر بعد توحيده إلى الدائرة الخارجية ، و لا يمكن أن يقل عددها عن فرشتين في المولد . تحقق الفرش و الأجزاء الحاملة لها تلامسا منزلقا ما بين المبدل الدائر و الأسلاك التي تتصل بصندوق الأطراف الخارجية . توضع الفرش على محور التعادل و هو الموضع ما بين الأقطاب الذي تكون فيه كثافة التدفق المغناطيسي صفرا حيث لايتولد جهد بين قطعتين متجاورتي و بالتالي لا يحدث أي شرر عندما تقصر القطعتان تحت الفرشة عند التبديل .

يشترط في استخدام الفرش التالي :

1.1.4.1-يكون عددها زوجيا دائما و يغطي عرضها قطعتان نحاسيتان من قطع المبدل

2.1.4.1- تحقق تبديل التيار بدون شرر

3.1.4.1- لا تكون صلبة جدا فتتلف المبدل و لامرنة جدة فتعيق عمله أي أن تشكل هي فقط قطع الإتلاف

4.1.4.1- لاتكون مصدر فقد للقدرة سواء كان ذلك عن طريق الاحتكاك أو مقاومة التلامس .

2.4.1- **حامل الفرش** :

5.1- **مهام المبدل والفرش** : تتلخص هذه المهام في النقاط التالية

1.5.1- كل قطعة من قطع المبدل تحقق التوصيل ما بين موصلات المنتج الفعالة حسب طريقة اللف .

2.5.1- المبدل والفرش يسمح بتوصيل ملفات المنتج مع الدائرة الخارجية الثابتة (الحمل للمولد أو مصدر التغذية للمحرك) .

3.5.1- بواسطة المبدل يتم توحيد الجهد المتولد على أطراف ملفات المنتج ، هذا الجهد يكون مترددا وجيبا .ونحصل بذلك على توحيد التيار المتردد الجيبي الذي يمر خلال الملفات و جعله في اتجاه واحد لنقله إلى الدائرة الخارجية كتيار مستمر و نحصل أيضا على قطبية واحدة عند كل فرشة .

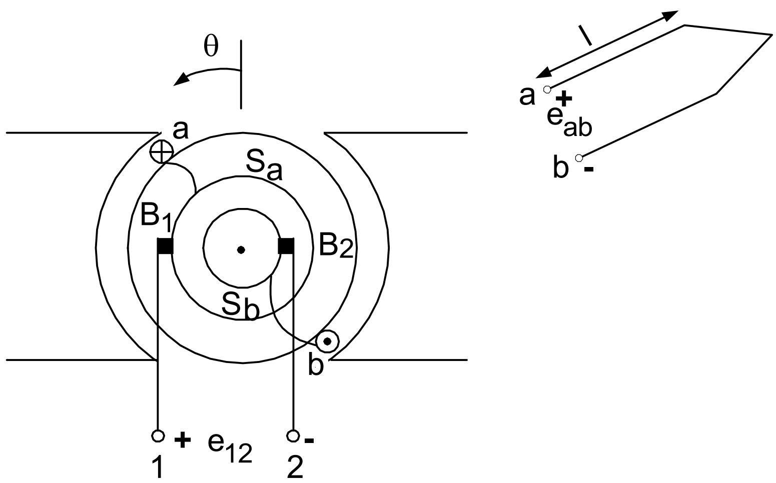
4.5.1- يغير المبدل التيار الذي نغذي به محرك التيار المستمر إلى تيار متردد داخل ملفات المنتج للحصول على عزم دوراني ذي اتجاه موحد .

6.1- أعضاء أخرى (ميكانيكية)

مهمة هذه الأعضاء تكمن في قدرتها على تثبيت الأعضاء المغناطيسية بالنسبة للأعضاء الكهربائية وتسهيل و تركيز عملية الدوران من بينها مبيت العضو الساكن مع أرجل و درعين واقيين واحد من جهة عمود الإدارة و الثاني من جهة المبدل تحقق الوقاية الميكانيكية للآلة و توجه هواء التبريد ، كراسي تحميل العضو الدائر ، تربينة التبريد ، صندوق توصيل أطراف الملفات، حاملان للفرش ، حلقة لرفع الآلة .

2- مبدء **عمل المبدل** :

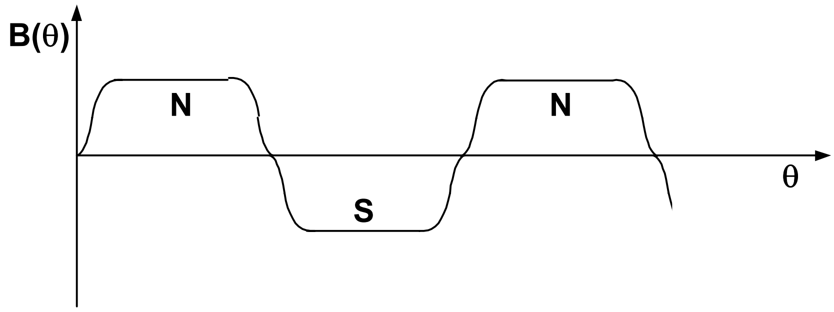
لتكن آلة تيار مستمر كما هي مبينة في الشكل ٢٠,١



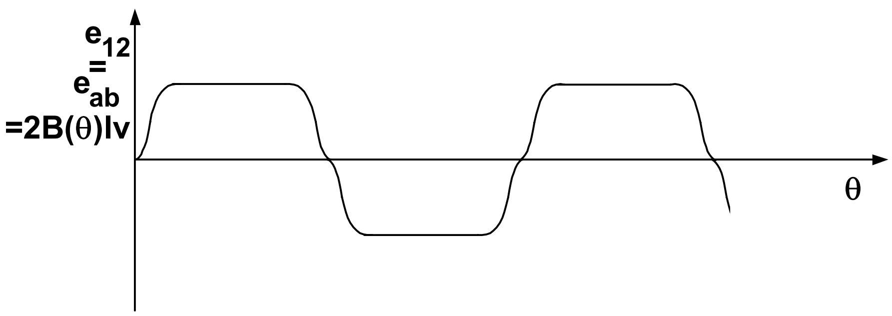
الشكل٢٠,١ : آلة تيار مستمر بقطعتين دائرتين و فرشتين

يبين الشكل(٢١,١) تغير كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية نتيجة للتناوب الطبيعي للأقطاب . الموصلان a وb طولهما l ، يكونان طرفي لفة واحدة و موضوعان في مجريين متعاكسين قطريا على العضو الدائر . يوصل طرفا اللفة إلى حلقتي انزلاق S_a و S_b . الفرشتان الساكنتان B_1 و B_2 تضغطان على حلقتي الانزلاق و تسمحان بالوصول إلى اللفة الدائرة . الجهد المتولد في اللفة ناتج أساسا عن الجهد المتولد في طرفي اللفة تحت الأقطاب $e = B(\theta)lu$. باستعمال قاعدة قطع الموصلات لخطوط قوى المجال ، الجهد

في كل طرف يساعد الآخر و بالتالي هما على التوالي : $e_{ab} = 2B(\theta)lu$. الجهد المتولد في اللفة e_{ab} هو نفس الجهد على طرفي الفرشتين ، بطبيعته متردد و شكله هو نفس شكل كثافة التدفق المغناطيسي في الفضاء الذي يعتبر موجة متغيرة بسبب التتابع الطبيعي للأقطاب المختلفة (شمال N و جنوب S) .

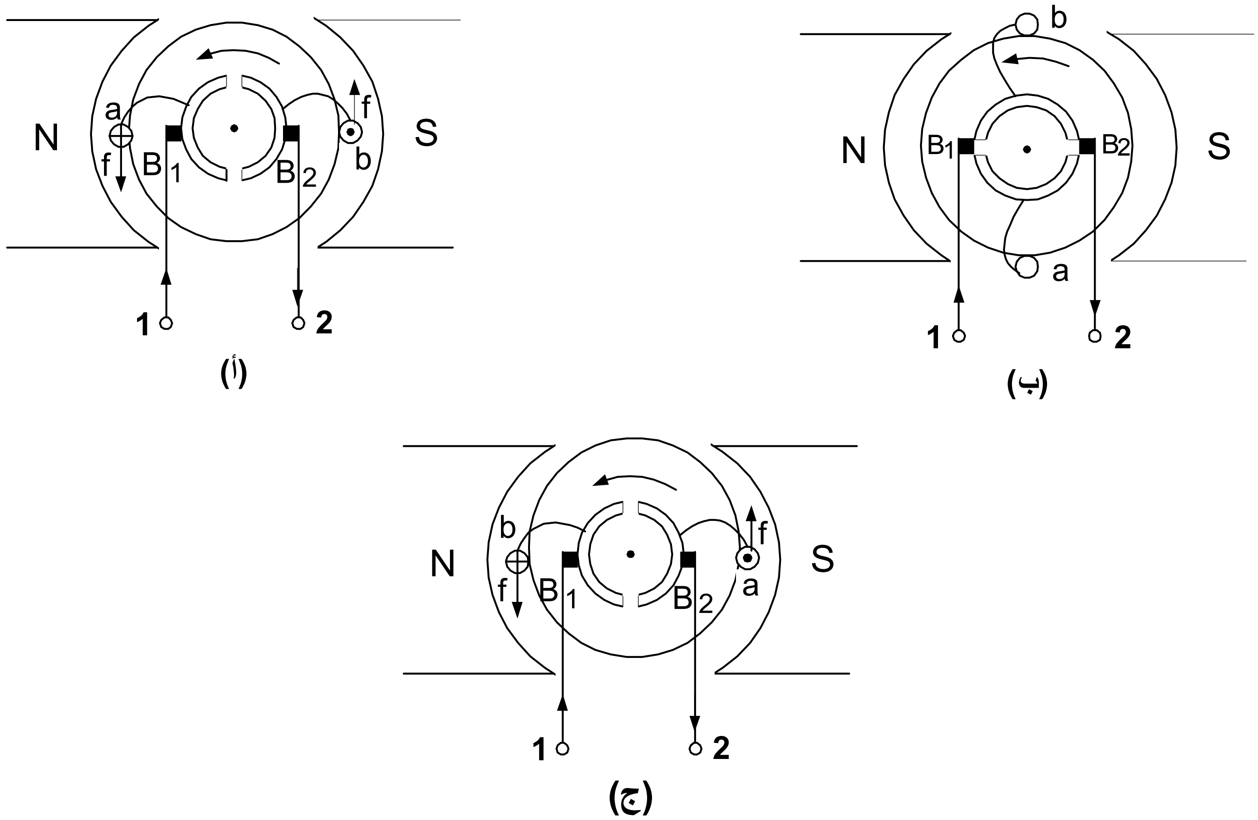


الشكل ٢١,١ : توزيع كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية



الشكل ٢٢,١ القوة الدافعة الكهربائية المترددة و المتولدة في لفة واحدة

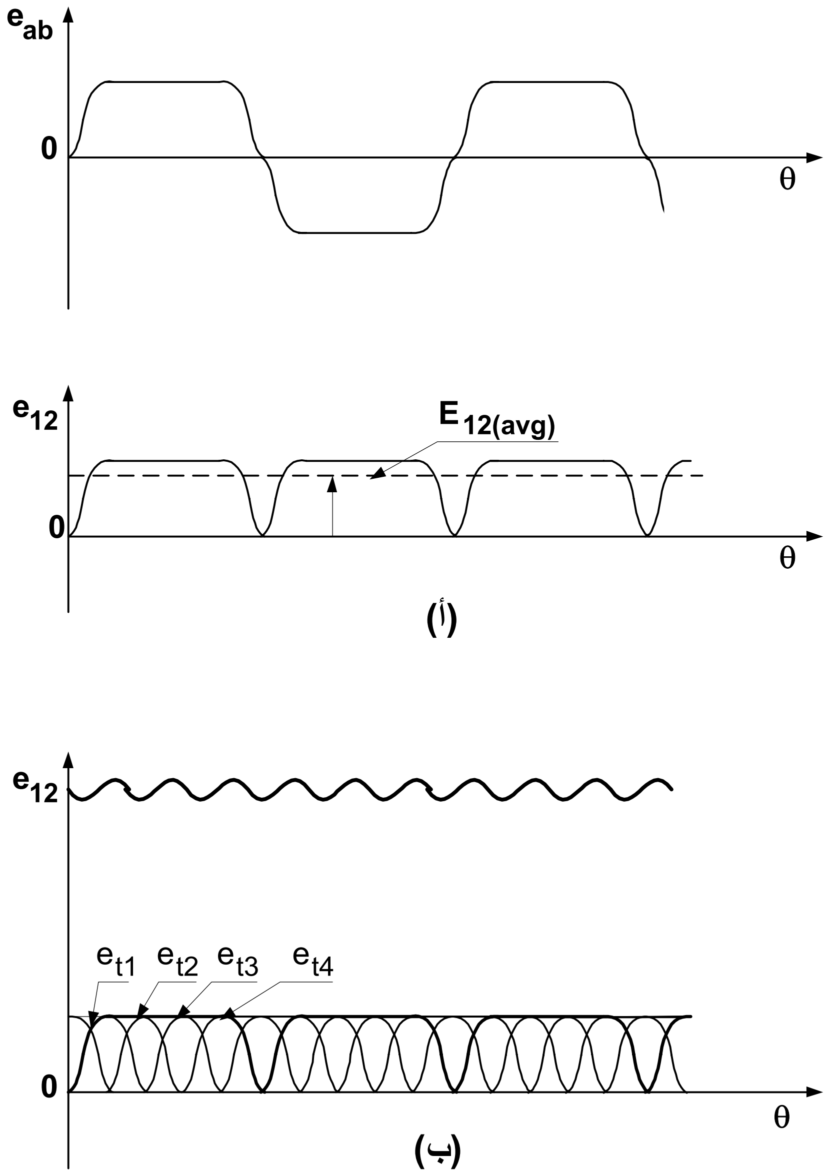
الآن بدلا من استخدام حلقتي انزلاق ، تستخدم واحدة منقسمة إلى نصفين C_a و C_b و هما قطعتان نحاسيتان معزولتان عن بعضهما و تنزلق عليهما فرشتان B_1 و B_2 كما هو مبين في الشكل (٢٣,١).
توصل القطعة C_a إلى طرف اللفة a بينما يوصل الطرف b إلى القطعة C_b . إذا كانت حركة العضو الدائر في الاتجاه المعاكس لدوران عقارب الساعة ، الطرف المتواجد تحت القطب الشمالي N يكون موجبا نسبة إلى الطرف المتواجد تحت القطب الجنوبي S و بالتالي فإن الفرشة B_1 تكون دائما موصلة إلى النهاية الموجبة للفة (أو للملف) و الفرشة B_2 للنهاية السالبة للفة (أو للملف) . يمكن الاستنتاج التالي : رغم أن الجهد المتولد في اللفة e_{ab} هو جهد متردد ، الجهد على طرفي الفرشتين e_{12} موحد الاتجاه كما هو مبين في الشكل ٢٢,١ و له قيمة متوسطة تختلف عن الصفر



الشكل١,٢٣ : مبدء عمل المبدل

توحيد الجهد باستعمال المبدل و الفرش لايخلو من التشوهات (ripple) . في الآلة الحقيقة يستعمل عدد كبير من اللفات التي توضع في مجار حول السطح الخارجي للعضو الدائر ، بتوصيل هذه اللفات على التوالي بواسطة قطع المبدل (لتشكيل ملفات عضو الاستنتاج) يمكن الحصول على جهد مستمر جيد خال من التشوهات على طرفي الفرشتين كما هو مبين في الشكل (١,٢٤).

ملاحظة : تقصر اللفة a-b بالفرشتين عندما يمر الطرفان a و b المكونان لها بمحور التعادل ما بين الأقطاب . في حالة محرك التيار المستمر تغذي ملفات عضو الاستنتاج عن طريق الفرشتين . ينعكس التيار الذي يمر في اللفة عندما تمر هذه الأخيرة بمحور التعادل و تقصر القطعتين .



توحيد الجهد بالمبدل والفرش
أ) آلة بلفة واحدة
ب) آلة متعددة اللفات

شكل ٢٤،١ : توحيد الجهد بالمبدل و الفرش

3- **ملفات عضو الإستنتاج** (armature winding):

في آلات التيار المستمر توضع ملفات المجال حول الأقطاب لاستثارة المجال المغناطيسي بينما توزع ملفات الاستنتاج أو المنتج في مجار على السطح الخارجي للعضو الدائر و على طوله حتى يتسنى للمبدل والفرش توحيد الجهد المتولد ، هنا بعض التعريفات المنسوبة لملفات المنتج :

❖ **اللفة (turn)** : و تتكون من موصلين معزولين عن بعضهما عزلا تاما و متصلين ببعضهما البعض من نهاية واحدة.

❖ **ملف (coil)**: يتكون من عدة لفات على التوالي .

❖ **حزمة أو طرف أوجانب الملف (coil side):** هي نصف الملف أو مجموعة الموصلات الفعالة المكونة للملف و المتواجدة داخل مجرى من مجاري العضو الدائر .

❖ **دائرة عضو الاستنتاج (armature winding or armature circuit)**: تتكون من عدة ملفات موصلة على التوالي ،مغلقة على نفسها و متناظرة حول الفرش .

لأغلبية آلات التيار المستمر ، خاصة الكبيرة منها أكثر من قطبين ، لذا تكون أغلبية موصلات عضو الاستنتاج في المنطقة ذات كثافة تدفق مغناطيسي عالية . إذا كانت لآلة تيار مستمر على الثابت أربعة أقطاب مثلا هذا يستلزم أن ملفات المنتج تولد كذلك أربعة أقطاب على العضو الدائر .

لاحظ أنه بالنسبة لآلة التيار المستمر بأربعة أقطاب ، عند الدوران في الثغرة الهوائية مرة واحدة (دورة واحدة ميكانيكية تساوي 360 m.d أو 2π m.r) نصادف دورتين لتغير كثافة التدفق المغناطيسي (دورتان كهربائيتان تساوي 2x360=720 e.d أو 2x2π=4π e.r) . يمكن استخلاص النتيجة التالية:

إذا كانت $\theta_{m.d}$ الدرجات الميكانيكية أو القياس الزاوي في الفضاء (mechanical degrees)

$\theta_{e.d}$ الدرجات الكهبائية أو القياس الزاوي في الدوران (electrical degrees)

P عدد أقطاب الآلة (number of poles)

يمكن كتابة العلاقة التالية :

$$\theta_{e.d} = \frac{P}{2}\theta_{m.d} \qquad (١٣,١)$$

❖ **الخطوة القطبية (pole pitch)** هي المسافة ما بين المركزين لقطبين متجاورين و تساوي دائما 180 e.d أو $\frac{360}{P}m.d$ و نرمز إليها Y_p .

❖ **خطوة الملف أو الخطوة الخلفية (coil pitch أو back pitch)** هي عدد جوانب الملفات للمرور من جانب الدخل إلى جانب الخرج لنفس الملف أي المسافة ما بين جانبي الملف ونرمز إليها Y_1 و يكون قريبا من الخطوة القطبية قدر الإمكان .

* **تكون خطوة اللف كاملة** (full coil pitch) إذا كانت خطوة الملف تساوي الخطوة القطبية (وتساوي 180 ed) و يسمى الملف في هذه الحالة ذا خطوة لف كاملة ، كما يمكن أن تكون خطوة الملف أكبر أو أصغر من الخطوة القطبية ، إلا أن معظم ملفات عضو الاستنتاج في آلات التيار المستمر من نوع الخطوة الكاملة أي $Y_1 = Y_p$.

❖ **الخطوة الأمامية** (front pitch) هي عدد جوانب الملفات للمرور من جانب خرج ملف معين إلى جانب دخل الملف الموالي و نرمز إليها Y_2 .

❖ **الخطوة الحاصلة** (resultant pitch)و نرمز إليها Y : الخطوات الثلاثة تجمعها العلاقة التالية

$$Y = Y_1 \pm Y_2 \qquad (١٤,١)$$

إشارة + أو – حسب طريقة اللف ، كما سيأتي .

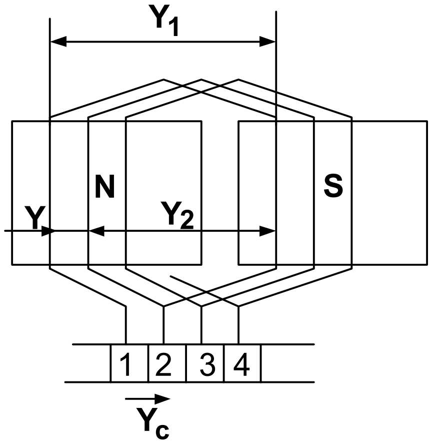
❖ **خطوة المبدل** (commutator pitch) هي عدد قطع المبدل ما بين القطعة الموصلة إليها بداية الملف والقطعة الموصلة إليها نهايته و نرمز إليها Y_c .

❖ **عدد دوائر المنتج على التوازي** (number of armature parallel paths) و نرمز إليه A

هناك طرق معينة لتوصيل ملفات المنتج فيما بينها من جهة وبقطع البدل من جهة ثانية ، تضمن الحصول على أكبر قيمة ممكنة و ثابتة للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة فيها كما هو مطلوب من الآلة وتوصيلها إلى الدائرة الخارجية عبر الفرشتين .

توجد طريقتان أكثر شيوعا للف ملفات الاستنتاج و ذلك حسب توصيل الملفات بالمبدل و كل طريقة تعطي خواص مختلفة :

1.3 اللف الانطباقي (Lap winding) :



شكل ٢٥,١ : اللف الانطباقي

في اللف الانطباقي البسيط تقع الملفات المتجاورة على مخطط اللف بقرب بعضها البعض و بالتالي توصل بداية و نهاية كل ملف بقطعتين متجاورتين من قطع المبدل . يلحم سلك نهاية الملف الأول بسلك بداية الملف الثاني على نفس القطعة إلخ بحيث يلحم سلك نهاية آخر ملف بسلك بداية الملف الأول . و النتيجة أن في طريقة التوصيل هذه تتابع كل ملفات المنتج ، زيادة على أنها مغلقة على نفسها بسبب توصيل الملف الأخير بالملف الأول . يوجد ملف واحد موصول ما بين قطعتين متجاورتين من قطع المبدل في اللف الانطباقي .

خاصية اللف الانطباقي الأكثر أهمية هي أن عدد دوائر ملفات المنتج على التوازي يساوي عدد أقطاب الآلة يساوي عدد الفرش ، $A = P$.

إذا كان C هو عدد ملفات المنتج و عدد قطع المبدل و P هو عدد الأقطاب ، فهنالك $\frac{C}{P}$ ملف في كل دائرة توازي من دوائر المنتج التي عددها P . يظهر الجهد الكلي المتولد في الملفات الموصلة على التوالي في دائرة واحدة ما بين الطرفين بحيث تكون الفرش المكونة للطرف الموجب موصلة مع بعضها و المكونة للطرف السالب مع بعضها ، فإذا كان عدد الأقطاب 4 مثلا ، تكون هناك 4 دوائر ما بين الطرف الموجب والطرف السالب لعضو الاستنتاج لها نفس الجهد المتولد .

كون اللف الانطباق له عدة دوائر على التوازي يجعله مناسبا للآلات ذات الجهد المنخفض و التيار العالي . مادام يمكن توزيع التيار على عدة دوائر ، هذا سيسمح باستخدام موصلات ذات مساحة مقطع معقولة حتى و لو كان التيار جد عاليا .

تجمع I_a تيار المنتج و I_c التيار الذي يمر في ملفات التوالي لدائرة التوازي الواحدة العلاقة:

$$I_c = \frac{I_a}{A} \qquad (١٥,١)$$

حيث A هو عدد دوائر المنتج على التوازي .

في اللف الإنطباقي

$$A = P \qquad (١٦,١)$$

و $$I_c = \frac{I_a}{P}$$

سمي اللف انطباقيا لأن عند اللف نرجع بالملفات إلى الوراء بحيث تنطبق على بعضها البعض .

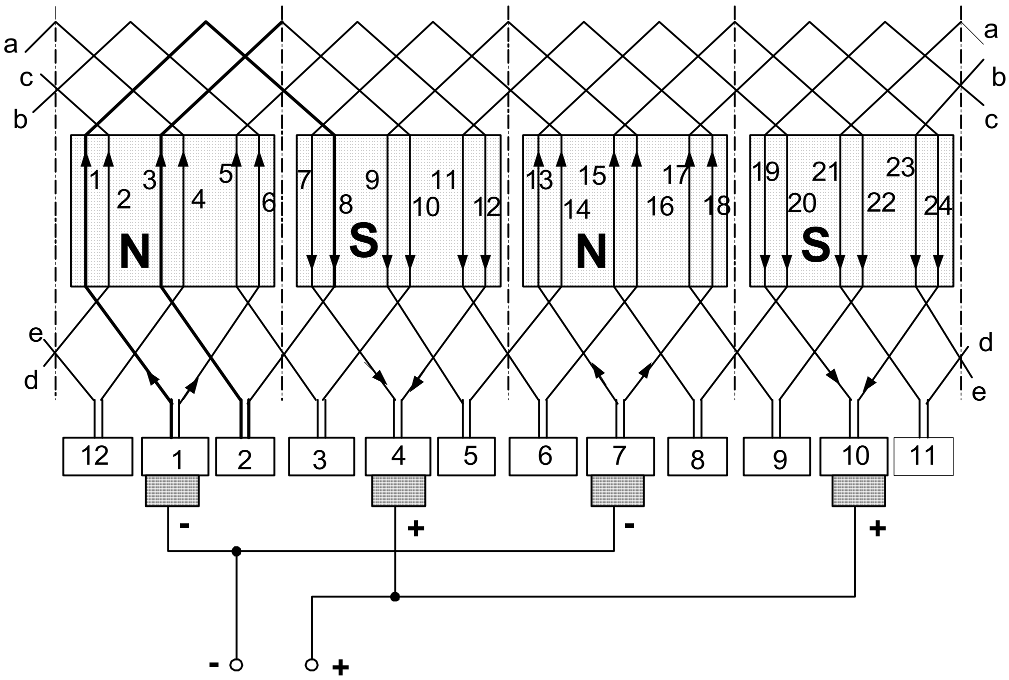
في اللف الانطباقي تكون العلاقة التي تجمع الخطوات الثلاثة : $Y = Y_1 - Y_2$ و خطوة المبدل $Y_c = \pm 1$ تكون الإشارة + إذا كان اللف الانطباقي متقدما و – إذا كان رجعيا .

- يكون **اللف الانطباقي متقدما** (progressive lap winding) إذا ما تم توصيل نهاية الملف بقطعة من قطع المبدل تكون ما قبل القطعة المتصلة بها بداية نفس الملف تكون خطوة المبدل في هذه الحالة $Y_c = +1$
- يكون **اللف الانطباقي رجعي** (retrogressive lap winding) إذا ما تم توصيل نهاية الملف بقطعة من قطع المبدل تكون ما بعد القطعة المتصلة بها بداية الملف. تكون خطوة المبدل في هذه الحالة $Y_c = -1$

إذا كان كل شيء مماثل فإن اتجاه دوران العضو الدائر الملفوف لفا انطباقيا تقدميا يكون معاكسا لإتجاه دوران العضو الدائر الملفوف لفا انطباقيا رجعيا .

- مثال عن اللف الانطباقي :

لملفات المنتج 24 جنب (أو حزمة) ، خطوة الملف (أو الخطوة الخلفية) $Y_1 = 7$ ، الخطوة الأمامية $Y_2 = 5$
تكون الخطوة الحاصلة $Y = Y_1 - Y_2 = 7 - 5 = 2$ ، خطوة المبدل في حالة اللف الانطباقي التقدمي $Y_c = +1$
يكون مخطط اللف الانطباقي لهذه الملفات كالتالي :



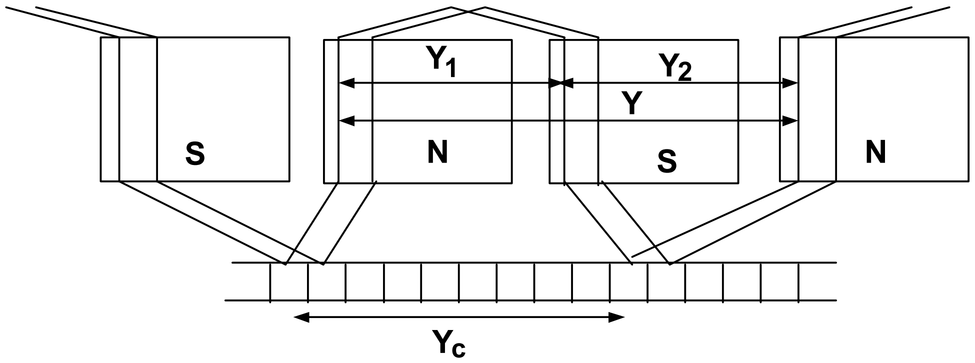
الشكل ٢٦،١ : مخطط لف انطباقي متقدم

2.3- اللف التموجي (series or wave winding) :

وجه الإختلاف بين اللف التموجي و اللف الانطباقي يكمن في موضع لحام أسلاك ملفات عضو الاستنتاج على قطع المبدل . في اللف الانطباقي البسيط توصل بداية و نهاية نفس الملف لقطعتين متجاورتين على المبدل $(Y_c = \pm 1)$ بينما في اللف التموجي توصل بداية و نهاية نفس الملف لقطعتين متباعدتين بخطوة مبدل تكون علاقتها العامة $Y_c = \frac{2(C \pm 1)}{P}$ حيث C عدد قطع المبدل و P عدد الأقطاب ، تكون الإشارة + إذا كان اللف التموجي تقدميا و — إذا كان رجعيا .

يسمى اللف تموجيا لأنه يلف في اتجاه واحد بحيث يوضع أحد جانبي الملف الأول تحت القطب الجنوبي مثلا ثم يوضع الجانب الثاني للملف تحت القطب الشمالي المجاور بخطوة ملف Y_1 ثم بعد ذلك لانرجع إلى الخلف كما في اللف الانطباقي و إنما يوصل الجانب الثاني للملف الأول بالجانب الأول للملف الثاني يقع

تحت القطب الموالي و هو شمالي في هذه الحالة بخطوة أمامية Y_2 بحيث تكون خطوة اللف الحاصلة $Y = Y_1 + Y_2$.



شكل ٢٧,١ : اللف التموجي

و تستمر العملية كذلك إلى أن تنتهي الدورة الأولى مما يعطي اللف شكلا تموجيا . نلاحظ أن بداية الدورة الثانية تكون من جانب ملف يقع في المجرى الموالي للمجرى الموضوع فيها جانب الملف الذي بدأت منه الدورة الأولى و يستمر اللف حتى يتم تعبئة جميع المجاري .

يمكن الملاحظة أن ما بين قطعتين متجاورتين من قطع المبدل هناك $\frac{P}{2}$ عدد ملفات موصلة على التوالي وهذا خلاف اللف الانطباقي الذي يوجد فيه ملف واحد بين قطعتين متجاورتين . إذا كانت نهاية الملف $\left(\frac{P}{2}\right)$ موصلة إلى قطعة ما قبل قطعة بداية الملف الأول يسمى اللف التموجي تقدميا (progressive wave winding) بينما إذا ما تم توصيل نهاية الملف $\left(\frac{P}{2}\right)$ إلى قطعة من قطع المبدل ما بعد قطعة بداية الملف الأول يسمى اللف التموجي رجعيا (retrogressive wave winding) .

ما بين فرشتين متجاورتين هناك $\frac{1}{P}$ قطعة مبدل إذا $\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{1}{P}\right)$ أو $\frac{1}{2}$ عدد ملفات عضو الاستنتاج لذا عدد دوائر ملفات المنتج في اللف التموجي يساوي دائما 2 .

$$(A = 2) \qquad (١٧,١)$$

التيار الذي يمر في الملفات على التوالي في الدائرة الواحدة $I_c = \frac{I_a}{2}$ ، هذا يجعل الملفات التموجية مناسبة جدا للآلات ذات الجهد العالي و التيار المنخفض .

إذا كان C عدد ملفات المنتج هناك إذا $\frac{C}{2}$ (أو نصف عدد الملفات) في كل دائرة . الفرش في هذه الحالة متباعدة بخطوة قطبية كاملة ، فعدد الفرش يساوي 2 تمثل إحداهما القطب الموجب و الأخرى القطب السالب .

مثال عن اللف التموجي :

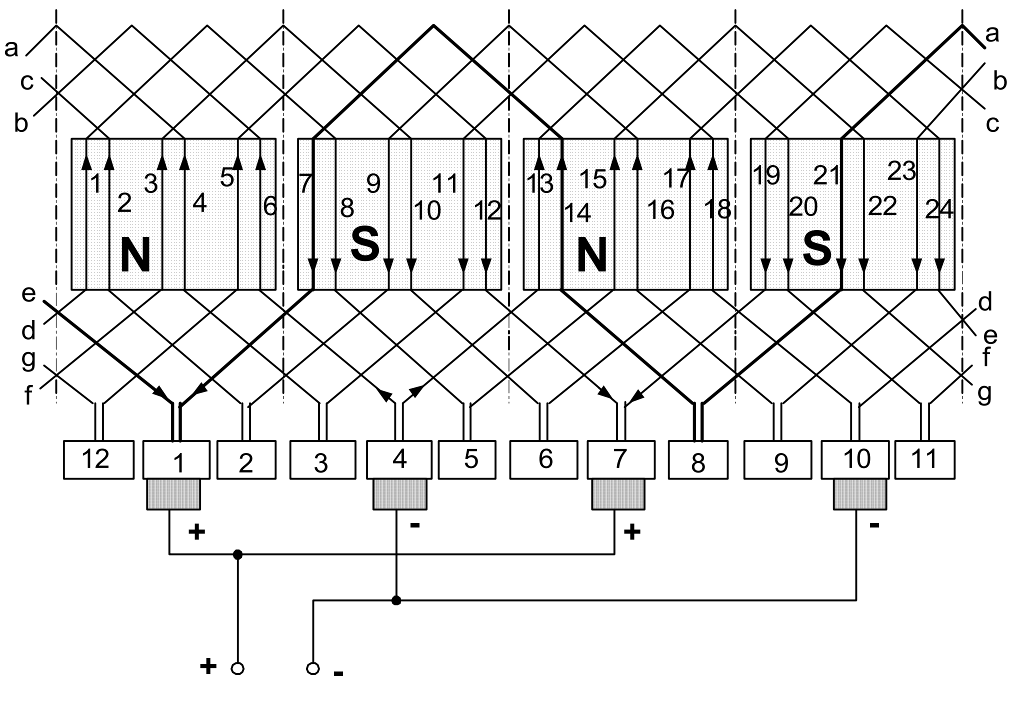
منتج آلة تيار مستمر ملفوف لفا تموجيا تقدميا ، له 21 جنب (أو حزمة)، 4 أقطاب ، خطوة الملف (أو الخطوة الخلفية) $Y_1 = 9$ ، الخطوة الأمامية $Y_2 = 13$ ، 21 قطعة مبدل .

تكون خطوة اللف الحاصلة : $Y = Y_1 + Y_2 = 9 + 13 = 22$

مادام هذا اللف التموجي تقدميا تكون خطوة المبدل :

$$Y_c = \frac{2(c+1)}{P} = \frac{2(21+1)}{4} = 11$$

يكون مخطط اللف لهذه الملفات كما هومبين في الشكل (٢٨،١).



الشكل ٢٨،١ : مخطط لف تموجي تقدمي

ملاحظة : في حالة ما يكون اللف التموجي رجعيا تكون خطوة المبدل :

$$Y_c = \frac{2(c-1)}{P} = \frac{2(21-1)}{4} = 10$$

4- معادلة القوة الدافعة الكهربائية (electromotive force (e.m.f) equation) ، E_a

عندما يدور عضو الاستنتاج في المجال المغناطيسي الناتج عن أقطاب الثابت يتولد جهد في ملفات الاستنتاج ، هذا الجهدمتعلق بثلاث عوامل هي :

1- التدفق المغناطيسي Φ للآلة

2- سرعة العضو الدائر w_m

3- ثابت k_a يتعلق بتركيب الآلة

تجدر الإشارة أن القوة الدافعة الكهربائية E_a لآلة التيار المستمر هي الق.د.ك المتولدة في دائرة توازي واحدة من دوائر عضو الاستنتاج و التي رمز عددها (A) .

لإيجاد علاقة الق.د.ك يمكن استعمال إحدى الطريقتين :

(أ) **قانون فاراداي** : التغير الزمني للتدفق المغناطيسي الكلي يولد ق.د.ك بالتأثير في الموصلات التي يخترقها .

(ب) **مدلول قطع الموصلات للتدفق المغناطيسي** : حينما تقطع موصلات خطوط القوى المغناطيسية تتولد فيها ق.د.ك .

الطريقتان تعطيان نفس العلاقة للق.د.ك .

الق.د.ك المتولدة في موصل طوله l مدفون في مجرى من مجاري عضو الاستنتاج و يتحرك بسرعة خطية $u(m/s)$ أو سرعة زاوية:

$$w_m = 2\pi \frac{n}{60} rd/s \qquad (١٨،١)$$

و n عدد اللفات في الدقيقة في مجال مغناطيس كثافته $B(\theta)$ مترددة في الفضاء :

$$e_c = B(\theta) l u \qquad (١٩،١)$$

تجمع السرعتان الخطية و الزاوية العلاقة $u = r\,w_m$ حيث r هي المسافة التي تفصل الموصل عن مركز عضو الاستنتاج و تعويضها في العلاقة السابقة يعطي :

$$e_c = B(\theta) l r\, w_m \qquad (١٩،١)$$

الق.د.ك الحاصلة المتولدة في لفة واحدة تكون الجمع ما دامت القوتان الدافعتان الكهربائيتان المتولدتان في الموصلين على التوالي :

$e_1 = 2B(\theta) l r\, w_m$ ، هذا جهد متردد لأن $B(\theta)$ متردد .

المقدار المتوسط للجهد المتولد $\overline{e_1}$ في اللفة الواحدة هو $\overline{e_1} = 2\overline{B(\theta)} l r\, w_m$ حيث $\overline{B(\theta)}$ هو المقدار المتوسط لكثافة التدفق المغناطيسي .

ليكن Φ التدفق المغناطيسي لكل قطب و A_p مساحة كل قطب و هي مساحة السطح الخارجي لعضو الاستنتاج (أسطوانة طولها l ونصف قطرها r) على عدد الأقطاب(P) : $A_p = \frac{2\pi rl}{P}$

يساوي المقدار المتوسط لكثافة التدفق المغناطيسي إذا $\overline{B(\theta)} = \frac{\Phi}{A_p} = \frac{\Phi P}{2\pi rl}$ ، تعويضها في $\overline{e_1}$ يعطي :

$$\overline{e_1} = 2\left(\frac{\Phi P}{2\pi rl}\right) lr\, w_m$$
$$= \frac{\Phi P}{\pi} w_m$$

الجهود المتولدة في كل اللفات الموصلة على التوالي في دائرة تواز واحدة لعضو الاستنتاج على طرفي الفرشتين الموجبة والسالبة تساهم في توليد الجهد الحاصل E_a للآلة .

إذا كان N هو العدد الكلي للفات عضو الاستنتاج و A عدد الدوائر على التوازي في عضو الاستنتاج $\frac{N}{A}$ هو عدد اللفات في كل دائرة توازي التي تساهم في توليد جهد الآلة :

$$E_a = \frac{N}{A}\overline{e_1}$$
$$= \frac{NP}{\pi A}\Phi\, w_m$$

إذا كان $k_a = \frac{NP}{\pi A}$ ثابت الآلة أو ثابت عضو الاستنتاج يمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة على الصيغة العامة التالية :

$$E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m \qquad (٢٠،١)$$

الوحدات المستعملة : $E_a(Volt)$ ، $\Phi(waber)$ ، $w_m\left(\frac{radians}{seconds}\right)$ ، k_a بدون وحدة

يمكن إعادة كتابة الثابت k_a بدلالة عدد موصلات عضو الإستنتاج Z ، $Z = 2N$ أو $N = \frac{Z}{2}$ و تعويضها في علاقة k_a يعطي :

$$k_a = \frac{NP}{\pi A} = \frac{ZP}{2\pi A} \qquad (٢١،١)$$

ملاحظة : علاقة الق.د.ك $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ المحصل عليها صالحة سواء كانت تعمل الآلة كمولد أو كمحرك . في حالة المولد تسمى E_a الجهد المتولد (generated voltage) بينما في حالة المحرك تسمى بالق.د.ك المضادة (back e.m.f) لأنها تعاكس جهد التغذية .

5- معادلة العزم الكهرومغناطيسي (electromagnetic torque equation) T_e :

هناك عدة طرق للحصول على معادلة عزم آلة التيار المستمر أي العزم المتولد في موصلات ملفات عضو الاستنتاج المتواجدة في المجال المغناطيسي الناتج عن أقطاب الثابت و عندما يمر فيها تيار كهربائي ، لكن الطريقة البسيطة هي استعمال مدلول قوة لابلاس كما سبق ذكره .

القوة الميكنيكية f_c التي يتعرض لها موصل طوله l مدفون في مجرى على السطح الخارجي لعضو الاستنتاج و متواجد في مجال مغناطيسي كثافته $B(\theta)$ عندما يمر فيه تيار كهربائي I_c هي :

$$f_c = B(\theta) l I_c = B(\theta) l \frac{I_a}{A}$$

I_a تيار المنتج الذي يمر للدائرة الخارجية (الحمل) في حالة المولد أو التيار الذي يمر في ملفات المنتج من التغذية الخارجية في حالة المحرك و A عدد دوائر أو مسارات المنتج على التوازي .

العزم الناتج عن موصل واحد :

$$T_c = f_c \cdot r$$

تكون القيمة المتوسطة لهذا العزم :

$$\overline{T_c} = \overline{B(\theta)} l \frac{I_a}{A} r \quad \text{لكن} \quad \overline{B(\theta)} = \frac{\Phi P}{2\pi r l}$$

$$= \frac{\Phi P}{2\pi r l} l \frac{I_a}{A} r$$

$$= \frac{\Phi P}{2\pi A} I_a$$

كل موصلات ملفات المنتج Z تولد عزما في نفس الاتجاه و بالتالي تساهم كلها في توليد العزم المتوسط الناتج عن المنتج T_e :

$$T_e = Z\overline{T_c}$$

$$= \frac{ZP}{2\pi A} \cdot \Phi \cdot I_a$$ لكن $\frac{ZP}{2\pi A}$ ما هو إلا ثابت الآلة k_a

يمكن كتابة معادلة العزم الكهرومغناطيسي على النحو التلي :

$$T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a \qquad (٢٢,١)$$

تبين المعادلة أن تفاعل التيار الكهربائي مع التدفق المغناطيسي يولد عزما .

في حالة المحرك القدرة الكهربائية الداخلة ($E_a \cdot I_a$) و التي يزودها النظام الكهربائي للمجال المغناطيسي يجب أن تساوي القدرة الميكانيكية الخارجة من عضو الاستنتاج ($T_e \cdot w_m$) و التي يسحبها النظام الميكانيكي الممثل في الحمل من عضو الاستنتاج بواسطة عمود الإدارة (shaft) .

العملية العكسية صحيحة أيضا بالنسبة لفعل المول .

$$E_a I_a = k_a \Phi w_m I_a = T_e w_m \qquad (23.1)$$

6- أمثلة :

مثال 1 : آلة تيار مستمر بأربعة أقطاب لها عضو استنتاج طوله $25cm$ و نصف قطره $12.5cm$. تغطي الأقطاب إلا 75% من مساحة سطح عضو الإستنتاج. تتكون دائرة المنتج من 33 ملف ، كل ملف يحتوي على 7 لفات مدفونة في 33 مجرى . القيمة المتوسطة لكثافة التدفق المغناطيسي تساوي $0.75T$.

١ -إذا كان المنتج ملفوفا لفا انطباقيا ، أوجد كلا من الآتي :

(أ) ثابت المنتج k_a

(ب) الجهد المتولد في المنتج E_a عندما يدور هذا الأخير بسرعة 1000 لفة في الدقيقة

(ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج I_c و العزم الكهرومغناطيسي الناتج عندما يكون تيار المنتج $I_a = 400A$

(د) القدرة الخارجة P_a من عضو الإستنتاج

2- إذا كان المنتج ملفوفا لفا تموجيا أعد حساب الأجزاء (من أ إلى د) . التيار الذي يمر في ملفات المنتج يجب أن يبقى مساويا للتيار في حالة اللف الانطباقي .

الحل :

1- آلة التيار المستمر ذات اللف الانطباقي :

(أ) ثابت المنتج $k_a = \dfrac{ZP}{2\pi A}$ ، $P = 4$ عدد الأقطاب ، $A = P = 4$ عدد دوائر المنتج على التوازي ، Z عدد موصلات ملفات المنتج ، إذا كان c عدد ملفات المنتج ، t عدد اللفات في الملف الواحد فإن $Z = 2ct = 2\times 33\times 7 = 462$ ، لذا يكون الثابت $k_a = \dfrac{462\times 4}{2\pi\times 4} = 73.53$

(ب) الجهد المتولد في المنتج $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ ، w_m السرعة الزاوية و Φ التدفق المغناطيسي لكل قطب $w_m = 2\pi\times\dfrac{n}{60} = 2\pi\times\dfrac{1000}{60} = 104.72\dfrac{rd}{s}$ ، $\Phi = A_p \times B$ ، A_p مساحة عضو الاستنتاج التي يغطيها القطب الواحد :

$$A_p = \frac{2\pi rl}{P}\times 075 = \frac{2\pi\times 12.5\times 10^{-2}\times 25\times 10^{-2}}{4}\times 0.75 = 36.8\times 10^{-3} m^2$$

التدفق المغناطيسي لكل قطب : $\Phi = 36.8\times 10^{-3}\times 0.75 = 0.0276Wb$

لذا يكون الجهد المتولد في المنتج : $E_a = 73.53\times 0.0276\times 104.72 = 212.5Volt$

(ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج : $I_c = \frac{I_a}{A} = \frac{I_a}{P}$

$= \frac{400}{4} = 100A$

العزم الكهرومغناطيسي : $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$

$= 73.53 \times 0.0276 \times 400 = 811.8 N \cdot m$

(د) القدرة الخارجة من عضو الاستنتاج : $P_a = E_a \cdot I_a$

$= 212.5 \times 400 = 85000W = 85Kw$

يمكن حساب هذه القدرة أيضا كالتالي : $P_a = T_e \cdot w_m$

$= 811.8 \times 104.72 = 85000W = 85Kw$

2- آلة التيار المستمر ذات اللف التموجي :

في اللف التموجي عدد المسارات المتوازية في دائرة عضو الاستنتاج يساوي دائما 2 أي $A = 2$

(أ) ثابت الآلة : $k_a = \frac{ZP}{2\pi A}$

$= \frac{462 \times 4}{2\pi \times 2} = 147.06$

(ب) الجهد المتولد في المنتج : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$

$= 147.06 \times 0.0276 \times 104.72 = 425 Volt$

(ج) التيار الذي يمر في ملفات المنتج : $I_c = 100A$

التيار الذي يخرج من عضو الاستنتاج إلى الدائرة الخارجية : $I_a = A I_c = 2 \times 100 = 200A$

العزم الكهرومغناطيسي : $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$

$= 147.06 \times 0.0276 \times 200 = 811.8 N \cdot m$

(د) القدرة الخارجة من عضو الاستنتاج : $P_a = E_a \cdot I_a$

$= 425 \times 200 = 85000W = 85Kw$

مثال 2 : آلة تيار مستمر 6 أقطاب ذات لف انطباقي . عدد ملفات عضو الاستنتاج 72 ، كل ملف يحتوي على 12 لفة . التدفق المغناطيسي لكل قطب 0.039 Wb و يدور المنتج بسرعة 400 لفة في الدقيقة

(أ) كم عدد المسارات المتوازية في دائرة المنتج .

(ب) احسب مقدار الجهد المتولد في المنتج .

الحل :

(أ) في اللف الانطباقي يساوي عدد المسارات المتوازية في دائرة المنتج عدد الأقطاب : $A = P = 6$

(ب) الجهد المتولد في المنتج : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$

ثابت الآلة : $k_a = \dfrac{ZP}{2\pi A}$

عدد الموصلات : $Z = 2ct = 2 \times 72 \times 12 = 1728$

$$k_a = \frac{1728 \times 6}{2\pi \times 6} = 275.02$$

السرعة الزاوية : $w_m = 2\pi \times \dfrac{n}{60} = 2\pi \times \dfrac{400}{60} = 41.89\, rds/\sec$

لذا يكون الجهد المتولد في المنتج : $E_a = 275.02 \times 0.039 \times 41.89 \approx 450 Volt$

مثال 3 : آلة تيار مستمر لها 12 قطب و ذات لف تموجي ، تتكون دائرة المنتج من 144 ملف و كل ملف يحتوي على 10 لفة . مقاومة كل لفة 0.011 Ω ، التدفق المغناطيسي لكل قطب 0.05 Wb و تدور الآلة بسرعة 200 لفة في الدقيقة .

(أ) كم هو عدد المسارات المتوازية في دائرة المنتج .

(ب) احسب الجهد المتولد في منتج هذه الآلة .

(ج) ما هو مقدار مقاومة ملفات المنتج الفعلية .

(د) إذا تم توصيل حمل مكون من مقاومة مقدارها 1 KΩ على طرفي هذا المولد أوجد العزم الكهرومغناطيسي المقاوم المطبق على عمود دوران الآلة (مع إهمال المقاومة الداخلية لملفات المنتج) .

الحل :

(أ) ما دام اللف تموجياً فإن عدد المسارات المتوازية في دائرة المنتج يساوي 2 أي $A = 2$.

عدد موصلات المنتج : $Z = 2ct = 2 \times 144 \times 10 = 2880$

ثابت الآلة : $k_a = \dfrac{ZP}{2\pi A} = \dfrac{2880 \times 12}{2\pi \times 2} \approx 2750$

السرعة الزاوية : $w_m = 2\pi \dfrac{n}{60} = 2\pi \times \dfrac{200}{60}$

$$= 20.94\, rds/\sec$$

الجهد المتولد في المنتج : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$

$$= 2750 \times 0.05 \times 20.94 \approx 2880 Volt$$

(ج) هناك مساران متوازيان في دائرة عضو الاستنتاج كل منهما يحتوي على $\dfrac{144}{2} = 72$ ملف و في كل ملف 10 لفات لذا يكون عدد اللفات في المسار الواحد : $N = 72 \times 10 = 720$

و بالتالي مقاومة الملفات في كل مسار : $R_1 = R_2 = 720 \times 0.011 = 7.92\Omega$

ما دام هناك مساران فإن المقاومة الفعلية للمنتج هي :

$$R_a = \frac{R_1 \times R_1}{R_1 + R_1} = \frac{R_1}{2} = \frac{7.92}{2} = 3.96\Omega$$

(د) إذا ما تم توصيل حمل مقاومته $R_L = 1000\Omega$ على طرفي المولد و إذا ما أهملنا مقاومة المنتج الداخلية R_a فسيمر تيار في الحمل مقداره : $I_a = \frac{E_a}{R_L} = \frac{2880}{1000} = 2.88A$

يكون إذا العزم الكهرومغناطيسي : $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$

$$= 2750 \times 0.05 \times 2.88 = 396 N \cdot m$$

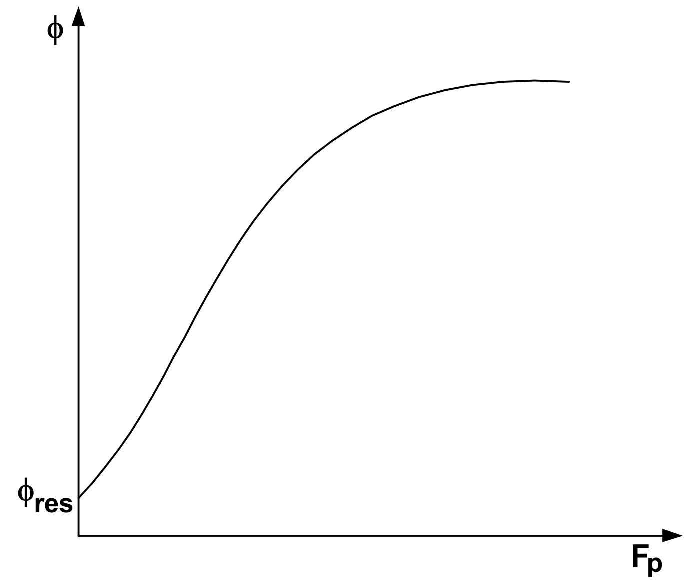
7- منحنى التمغنط :

التدفق المغناطيسي لكل قطب في آلة التيار المستمر متعلق بالقوة الدافعة المغناطيسية (أو عدد اللفات بالأمبير) لملفات المجال المتمركزة على الأقطاب و المقاومة المغناطيسية للمسار المغناطيسي .

يمر التدفق المغناطيسي Φ عبر القطب ، الثغرة الهوائية ، أسنان العضو الدائر ، الثغرة الهوائية و القطب المعاكس ثم يرجع عبر فك ثابت الآلة . العناصر المختلفة للدائرة المغناطيسية ممثلة بمقاومات منفصلة . التدفق المغناطيسي الذي يعبر الثغرة الهوائية تحت كل قطب يتعلق بالقوة الدافعة المغناطيسية F_p (و تبعا لذلك بتيار المجال) لملفات الأقطاب .

عند القيم المنخفضة للتدفق المغناطيسي يمكن القول إن للمادة المغناطيسية معامل نفاذية ما لانهاية مما يعطي مقاومة مغناطيسية صفر لكل أجزاء القلب الحديدي .

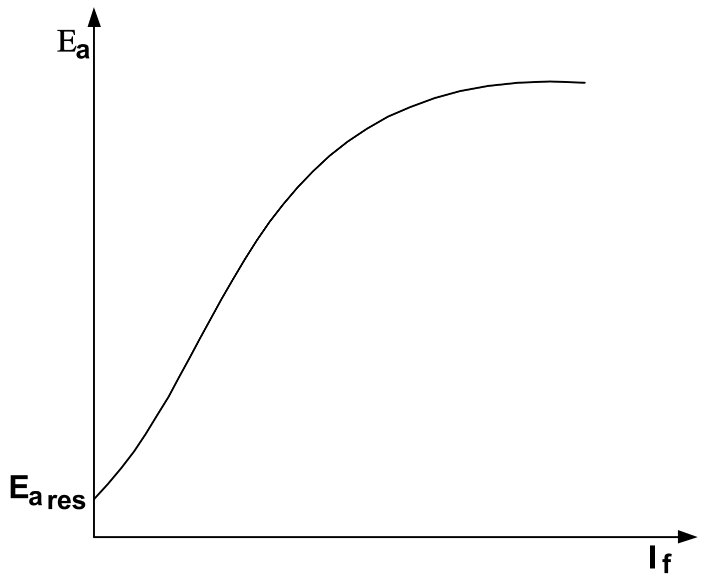
التدفق المغناطيسي لكل قطب يكون $\Phi = \frac{2F_p}{2R_g} = \frac{F_p}{R_g}$ ، إذا زادت الق.د.م يزيد معها خطيا التدفق المغناطيسي حتى تحصل مرحلة التشبع لأجزاء الدائرة المغناطيسية المختلفة و بعدها تصبح الزيادة غير خطية . يبين الشكل التالي العلاقة ما بين الق.د.م اللازمة لإثارة المجال و التدفق المغناطيسي Φ في كل قطب .



الشكل ٢٩،١ : منحنى التمغنط

بدون إثارة للمجال (تيار إثارة يساوي صفرا)، يكون التدفق المغناطيسي في القلب Φ_{res} و هو التدفق المغناطيسي المتبقي من التشغيل السابق .

الجهد المتولد في ملفات المنتج متناسب مع الدفق المغناطيسي لكل قطب Φ و السرعة الزاوية w_m حسب العلاقة : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$. يكون من المناسب جدا إذا عبرنا عن منحنى التمغنط بدلالة الجهد المتولد في المنتج E_a عند سرعة معينة . الشكل التالي يبين منحنى التمغنط المحصل عليه عن طريق التجربة بتدوير الآلة عند سرعة معينة ثم قياس الجهد على أطراف المولد بدون حمل مع تغيير الق.د.م F_p (تغيير تيار المجال I_f) .



الشكل ٣٠،١ : منحنى التمغنط $E_a = f(F_p)$

منحنى التمغنط $E_a = f(F_p)$ له أهمية قصوى لأنه يمثل مستوى التشبع في الدائرة المغناطيسية لآلة التيار المستمرعند قيم مختلفة للق.د.م (أو تيار الاستثارة I_f) .

8- تصنيف آلات التيار المستمر :

يمكننا الحصول على المجال المغناطيسي باستخدام أقطاب مغناطيسية ثابتة أو دائمة و لكن عيب هذه الطريقة :

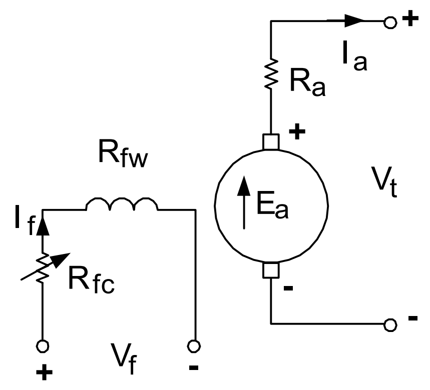
(أ) نحتاج إلى مغناطيس حجمه كبير جدا لكبر المجال المطلوب .

(ب) المجال في هذه الأحوال يضعف مع مرور الوقت مما يؤدي إلى نقصان الق.د.ك و قد أدى ذلك إلى استخدام الأقطاب الدائمة في الآلات الكهربائية في أغراض محدودة فقط مثل المحركات الصغيرة المستعملة في لعب الأطفال .

والطريقة الثانية الأكثر شيوعا للحصول على المجال المغناطيسي اللازم في الآلات الكهربائية تكون بإستخدام المغناطيسيات الكهربائية و هي تتكون من إقطاب مغناطيسية تحمل ملفات يمر فيها تيار كهربائي يعمل على استثارة المجال المغناطيسي بالشدة اللازمة و يطلق على هذه الملفات اسم ملفات الاستثارة أو ملفات المجال كما أن التيار الذي يمر في هذه الملفات يسمى بتيار الاستثارة أو تيار المجال I_f توصل ملفات المجال للملفات المنتج حسب طرق عدة مما يعطي للآلة خصائص أداء مختلفة الشيء الذي يعتبر من مزايا آلات التيار المستمر .

طرق الحصول على تيار الاستثارة I_f :

1.8- من مصدر كهربائي خارجي و مستقل عن الآلة نفسها و يطلق عليها اسم الاستثارة المستقاة أو المنفصلة (separate excitation) الممثلة في الشكل (٣١,١) . تسمى الآلة في هذه الحالة ذات استثارة منفصلة



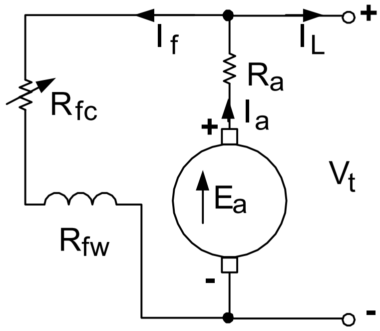
شكل ٣١,١: مولد استثارة منفصلة

2.8- من الآلة الكهربائية نفسها و يقال في هذه الحالة أن الآلة ذات استثارة ذاتية

(self-excitation) . و تعتمد هذه الطريقة على المغناطيسية المتبقية Φ_{res} في الأقطاب المغناطيسية حتى يمكن البدء في تكوين المجال المغناطيسي في الآلة بعملية تعاقبية و استطرادية و تؤدي فيها زيادة شدة المجال

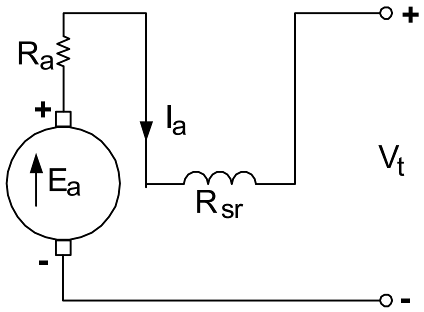
و تختلف عملية الاستثارة الذاتية في آلات التيار المستمر باختلاف طرق توصيل ملفات الاستثارة مع ملفات عضو الاستنتاج (أو طرفي الآلة) و تنقسم إلى ثلاثة أقسام و هي :

1.2.8- استثارة تواز : (shunt-excitation) في هذه الحالة توصل ملفات المجال على التوازي مع ملفات المنتج و تسحب ملفات المجال قدرتها مباشرة من طرفي عضو الاستنتاج في الآلة (الشكل ٣٢،١) .



شكل ٣٢،١: مولد استثارة توازٍ

2.2.8- استثارة توالٍ : (series excitation) توصل ملفات المجال على التوالي مع ملفات المنتج .

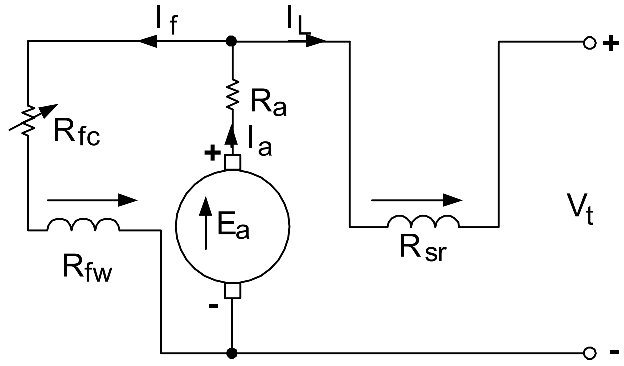


الشكل ٣٣،١: مولد لإستثارة توالي

ملاحظة : يكون لملفات التوازي عدد لفات أكبر من ملفات التوالي لكنها تسحب تياراً قليلاً (أقل من 5% من تيار المنتج الاسمي) بينما ملفات التوالي يكون عدد لفاتها أقل و تحمل تياراً أكبر .

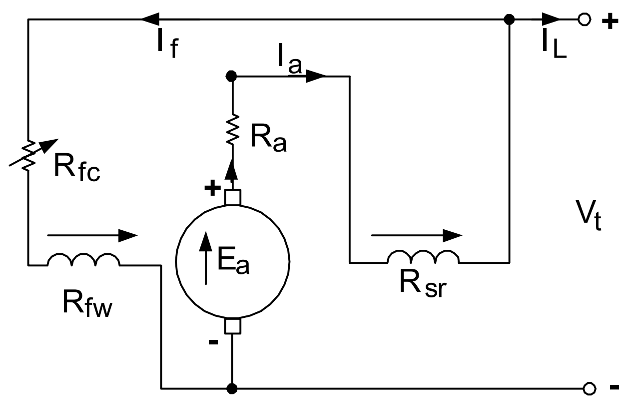
3.2.8- استثارة مركبة : (compound excitation) هذا النوع من الاستثارة يستعمل ملفين (تواز و هو الملف الرئيسي و توال وهو ملف إضافي) لاستثارة المجال المغناطيسي . يتم لف ملف التوالي فوق ملف التوازي . إذا ما تم توصيل ملف التوازي مباشرة على التوازي مع طرفي المنتج تسمى الآلة ذات تركيب قصير بينما إذا كان على التوازي مع الدائرة المكونة من ملفات المنتج على التوالي مع ملفات التوالي تسمى الآلة ذات تركيب طويل . ليس هناك أي فرق معتبر ما بين التوصيلين . في الآلة ذات الاستثارة

المركبة مجال ملف التوالي إما يساعد مجال ملف التوازي الرئيسي و يسمى هذا التركيب تراكمياً (cummulatively compounded excitation)



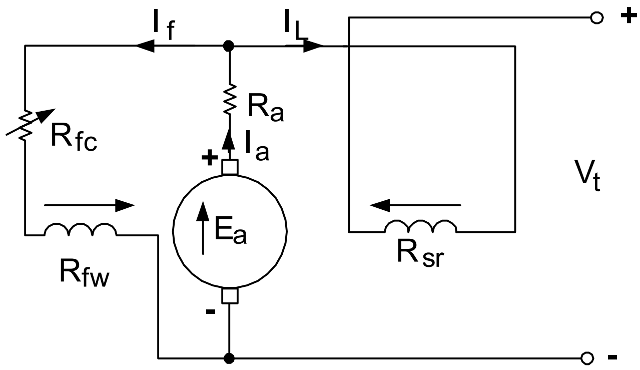
شكل ٣٤،١: مولد مركب قصير تراكمي

ويكون إما قصيرا أو طويلا .

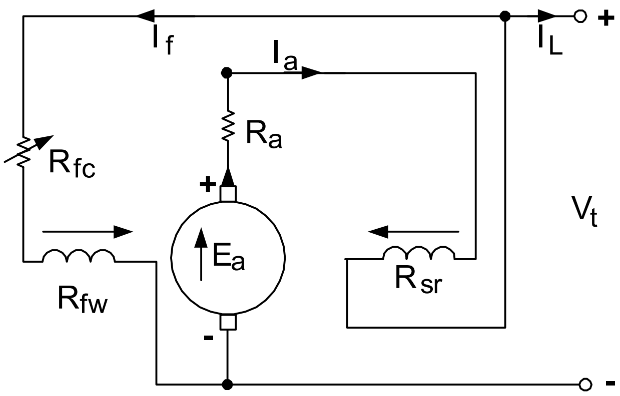


الشكل ٣٥،١: مولد مركب طويل تراكمي

و إما يعاكسه و يسمى هذا التركيب تفاضلياً أو فرقياً (differentially compounded excitation) و يكون أيضا إما قصيرا أو طويلا .



الشكل ٣٦،١: مولد مركب قصير تفاضلي



الشكل ٣٧,١: مولد مركب طويل تفاضلي

ينتج عن هذه الأنواع العدة للاستثارة خصائص أداء مختلفة للآلة .

9 - تدفق القدرة ، مفاقيد و كفاءة آلات التيار المستمر :

عندما تشتغل آلة التيار المستمر كمولد تكون قدرة دخلها القدرة الميكانيكية التي يعطيه لها المحرك الميكانيكي الأولي (prime mover) . جزء من قدرة الدخل يبدد كمفاقيد دوارة اللازمة لإدارة الآلة ضد الاحتكاك و مقاومة الهواء (مفاقيد ميكانيكية) ، كما يدخل من ضمنها المفاقيد الحديدية . الجزء الباقي من قدرة الدخل يحول إلى قدرة كهربائية متولدة $E_a I_a$ و التي كمية منها تضيع كمفاقيد نحاسية في مقاومات الملفات حسب قانون مربع التيار $I^2 R$. القدرة الكهربائية المتبقية تمثل قدرة خرج المولد و التي يمكن سحبها من أطرافه عند التحميل . بينما عند التشغيل كمحرك تكون قدرة الدخل القدرة الكهربائية التي يسحبها من الشبكة الكهربائية و قدرة الخرج المقدار الصافي للقدرة الميكانيكية المتولدة و التي يمكن سحبها من عمود الإدارة .

١,٩ - المفاقيد في آلات التيار المستمر :

يمكن تقسيم المفاقيد في آلات التيار المستمر سواء كانت مولدات أو محركات إلى خمسة أنواع أساسية

- مفاقيد كهربائية أو نحاسية (مفاقيد $I^2 R$)
- مفاقيد تلامس الفرش
- مفاقيد القلب الحديدي
- مفاقيد ميكانيكية
- مفاقيد شاذة

و تتحول هذه المفاقيد إلى حرارة تعمل على رفع درجة حرارة الآلة مما قد يتسبب عنه تلف المواد العازلة وحدوث دوائر قصر بين الملفات مما قد يدمر الآلة نفسها و لذلك يجب الحد من قيمة هذه المفاقيد و لهذا

السبب بالذات و كذلك لكي نحصل على معامل جودة (كفاءة) مرتفع يعمل على خفض تكاليف تشغيل الآلة .

٩,١,١ - **المفاقيد النحاسية** (copper losses) :

المفاقيد النحاسية هي مفاقيد تحصل عند مرور تيار في ملفات مجال الأقطاب (توالي و توازي) و منتج الآلة و ملفات الأقطاب المساعة (أقطاب التبديل) و الملفات الإضافية (ملفات التعويض) إن وجدت .

و حسابها يكون بضرب مقاومة الملفات المعنية بمربع التيار الذي يمر فيها ، مثلا تكون المفاقيد النحاسية في ملفات المنتج $P_A = I_a^2 R_a$ و في ملفات مجال التوازي $P_F = I_f^2 R_{fw}$

حيث I_a و R_a تيار و مقاومة ملفات المنتج ، I_f و R_{fw} تيار و مقاومة ملفات مجال التوازي .

المقيمة المستعملة في هذه الحسابات للمقاومة تكون عند حرارة التشغيل العادية . المفاقيد النحاسية تتغير مع تغير تيار المنتج و المجال .

٩,١,٢ - **مفاقيد تلامس الفرش** (brush losses) :

فقد تلامس الفرش هو فقد القدرة الذي ينشأ عن مقاومة تلامس فرش الآلة ويعطى بالعلاقة $P_{BD} = V_{BD} I_a$ حيث V_{BD} هو هبوط جهد تلامس الفرش و I_a تيار المنتج وغالبا ما نحسبه على أساس مقدار ثابت من الجهد (حوالي 2 V) في كل مجموعة فرش أو أن تدخل في حساب مقاومة المنتج .

٩,١,٣ - **مفاقيد القلب الحديدي** (core losses) :

تتكون مفاقيد القلب الحديدي من مفاقيد التخلف المغناطيسي ومفاقيد التيارات الإعصارية وتوجد في أجزاء من الآلة التي تتعرض لمجال مغناطيسي متغير مع الزمن وينصب هذا على عضو الاستنتاج في آلة التيار المستمر نتيجة لدورانه في مجال الأقطاب . تتوقف مفاقيد القلب الحديدي على تيار الاستثارة فإن كان ثابتا تكون هي الأخرى تقريبا ثابتة .

٩,١,٤ - **المفاقيد الميكانيكية** (mechanical losses) :

تنشأ هذه المفاقيد عن التأثيرات الميكانيكية و هي نوعان أساسيان : احتكاك و مقاومة الهواء .

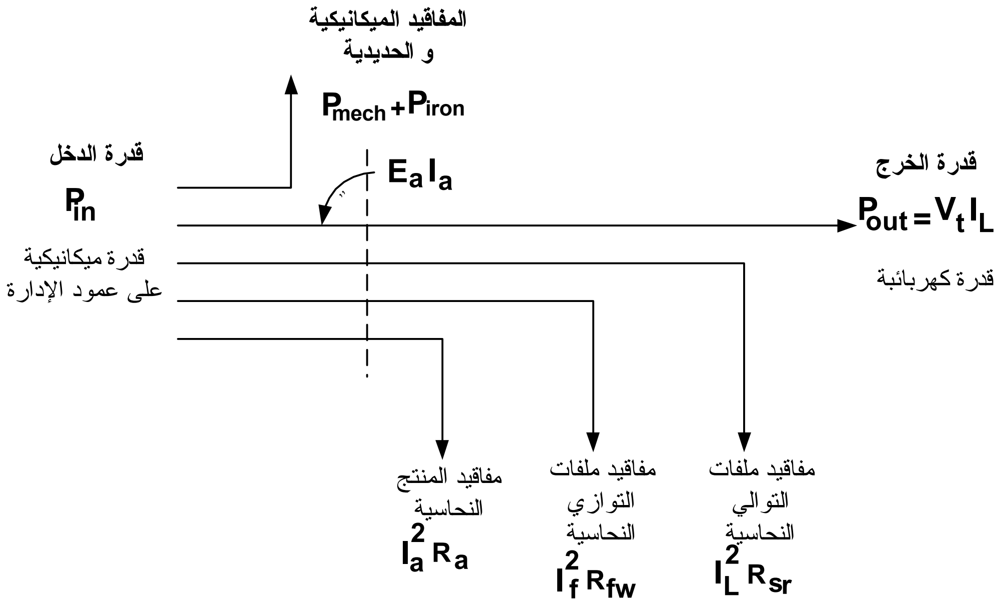
مفاقيد الاحتكاك يتسبب فيها الاحتكاك في كراسي التحميل بينما مفاقيد مقاومة الهواء يتسبب فيها الاحتكاك ما بين أعضاء الآلة الدوارة و الهواء . تتعلق المفاقيد الميكانيكية بسرعة الآلة التي في حالة المولد تكون ثابتة باستمرار .

٩,١,٥ - **المفاقيد الشاذة** (stray losses) :

هي المفاقيد التي لا تدخل في الأنواع الأربعة السابقة وغالبا ما نأخذها 1% من الحمل الكامل .

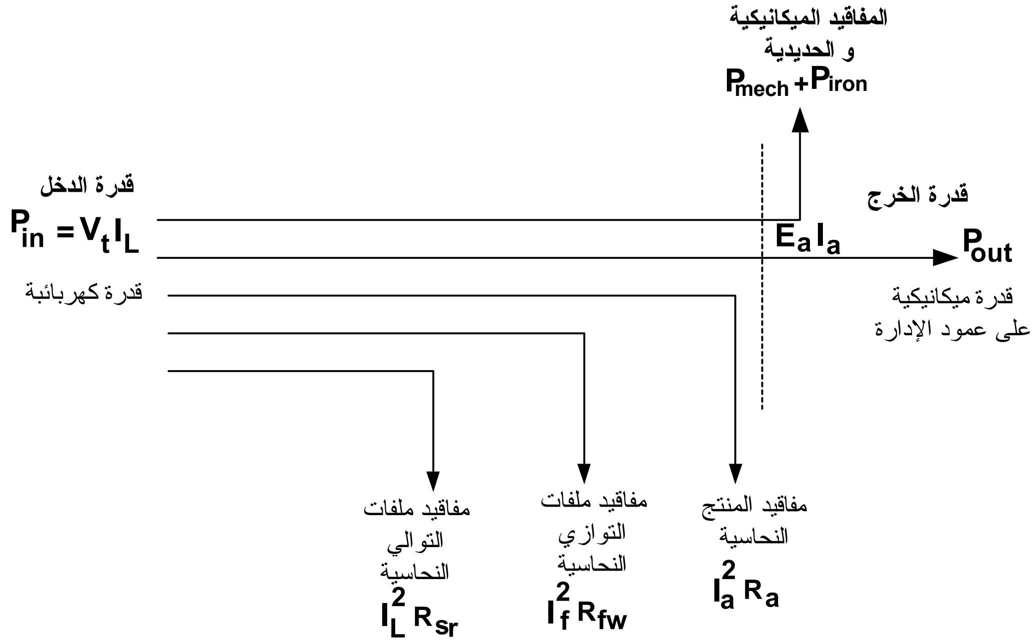
٢,٩ - **مخطط تدفق القدرة** (power- flow diagram) :

مخطط تدفق القدرة هو واحدة من أنسب التقنيات في أخذ بعين الاعتبار مفاقيد القدرة في آلة التيار المستمر . يبين الشكل (١,٣٨) مخطط قدرة مولد تيار مستمر .في هذا الشكل القدرة الداخلة للآلة هي قدرة ميكانيكية و بعد ما تطرح منها المفاقيد الشاذة ، المفاقيد الميكانيكية و مفاقيد القلب الحديدي تحول إلى قدرة كهربائية عند النقطة المسماة P_{con} . تعطى القدرة الميكانيكية المحولة بالعلاقة $P_{con} = T_e w_m$ و القدرة الكهربائية المتولدة بالعلاقة $P_{con} = E_a I_a$ مع العلم أن هذه الأخيرة لا تظهر كلية على أطراف المولد ، قبل ما تصل إلى الأطراف أو الخرج يطرح منها المفاقيد النحاسية و مفاقيد تلامس الفرش .



الشكل ٣٨,١: مخطط تدفق القدرة في مولد مركب قصير

في حالة المحرك يعكس مخطط تدفق قدرة المولد السابق الشكل (٣٩,١)



الشكل ٣٩,١ مخطط تدفق القدرة في محرك مركب قصير

٣,٩ - حساب الكفاءة أو الجودة (efficiency) :

تعرف كفاءة آلات التيار المستمر بالمعادلة :

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \qquad (٢٤,١)$$

أي قسمة قدرة الخرج على قدرة الدخل .

الفرق ما بين قدرة دخل و قدرة خرج الآلة هو المفاقيد الكلية التي تحصل داخلها و بالتالي يمكن إعادة كتابة معادلة الكفاءة :

$$\eta\% = \frac{P_{in} - \sum P_{losses}}{P_{in}} \times 100 \qquad (٢٥,١)$$

أو بشكل آخر:

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100 \qquad (٢٦,١)$$

يمكن استخدام أي من القوانين الثلاثة لحساب كفاءة آلات التيار المستمر .

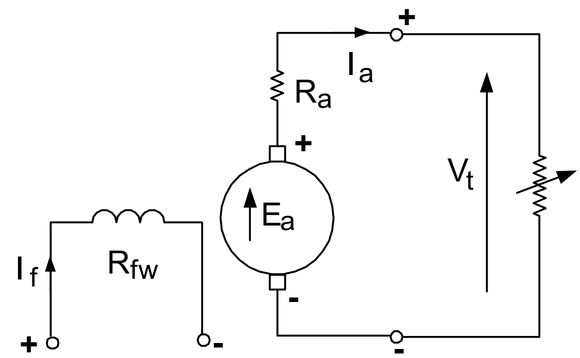
٣,١ - مولدات التيار المستمر

آلةالتيار المستمر التي تعمل كمولد تديرها آلة ثانية (محرك ديزل ، تربينة بخارية أو محرك كهربائي) وبسرعة ثابتة ويوصل طرفا عضو الاستنتاج للحمل . في كثير من التطبيقات التي تستعمل مولدات التيار المستمر يكون من المهم معرفة تغير جهد الأطراف بتيار الحمل ، تسمى هذه الخاصية بالخاصية الخارجية

١ - مولدات التيار المسمر ذات الاستثارة المنفصلة

كما سبق وأن أشير إليه فإن في مولد التيار المستمر ذي الاستثارة المنفصلة توصل ملفات المجال أو الاستثارة إلى مصدر قدرة (تيار مستمر) منفصل و خارجي عن الآلة . هذا المصدر قد يكون مولد تيار مستمر آخر ، مبدل تيار متردد إلى مستمر المستعمل لإلكترونيات القدرة أو حتى بطاريات .

الدائرة الكهربائية المكافئة لمولد التيار المستمر ذي الاستثارة المنفصلة في الحالة المنتظمة تكون كالتالي :



الشكل ٤٠,١ : مولد استثارة منفصلة عند التحميل

R_{fc} مقاومة التحكم المستعملة في دائرة المجال

R_{fw} مقاومة ملفات المجال

$R_f = R_{fc} + R_{fw}$ المقاومة الكلية لدائرة المجال

R_L مقاومة الحمل

I_f تيار المجال ، I_a تيار المنتج ، I_L تيار الحمل ، V_f جهد الاستثارة ، V_L أو V_t جهد الأطراف الخارجية .

في الحالة المنتظمة محاثات ملفات المجال و المنتج لا تأخذ بعين الاعتبار .

١،١ - المعادلات التي تعرف مولد التيار المستمر ذي الاستثارة المنفصلة :

$$E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m \quad (٢٧،١)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (٢٨،١)$$

$$= I_L R_L$$

$$I_a = I_L$$

$$V_f = I_f R_f \quad (٢٩،١)$$

$$P_e = E_a I_a \quad (٣٠،١)$$

$$P_{losses} = P_{i.loss} + P_{m.loss} + P_{c.loss} \quad (٣١،١)$$

$$P_{c.loss} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a \quad (٣٢،١)$$

$$P_{out} = V_L I_L \quad (٣٣،١)$$

$$= I_L^2 R_L$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{losses} \quad (٣٤،١)$$

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (٣٥،١)$$

٢،١ - رد فعل عضو الاستنتاج :

1.2.1- تعريف رد فعل عضو الاستنتاج :

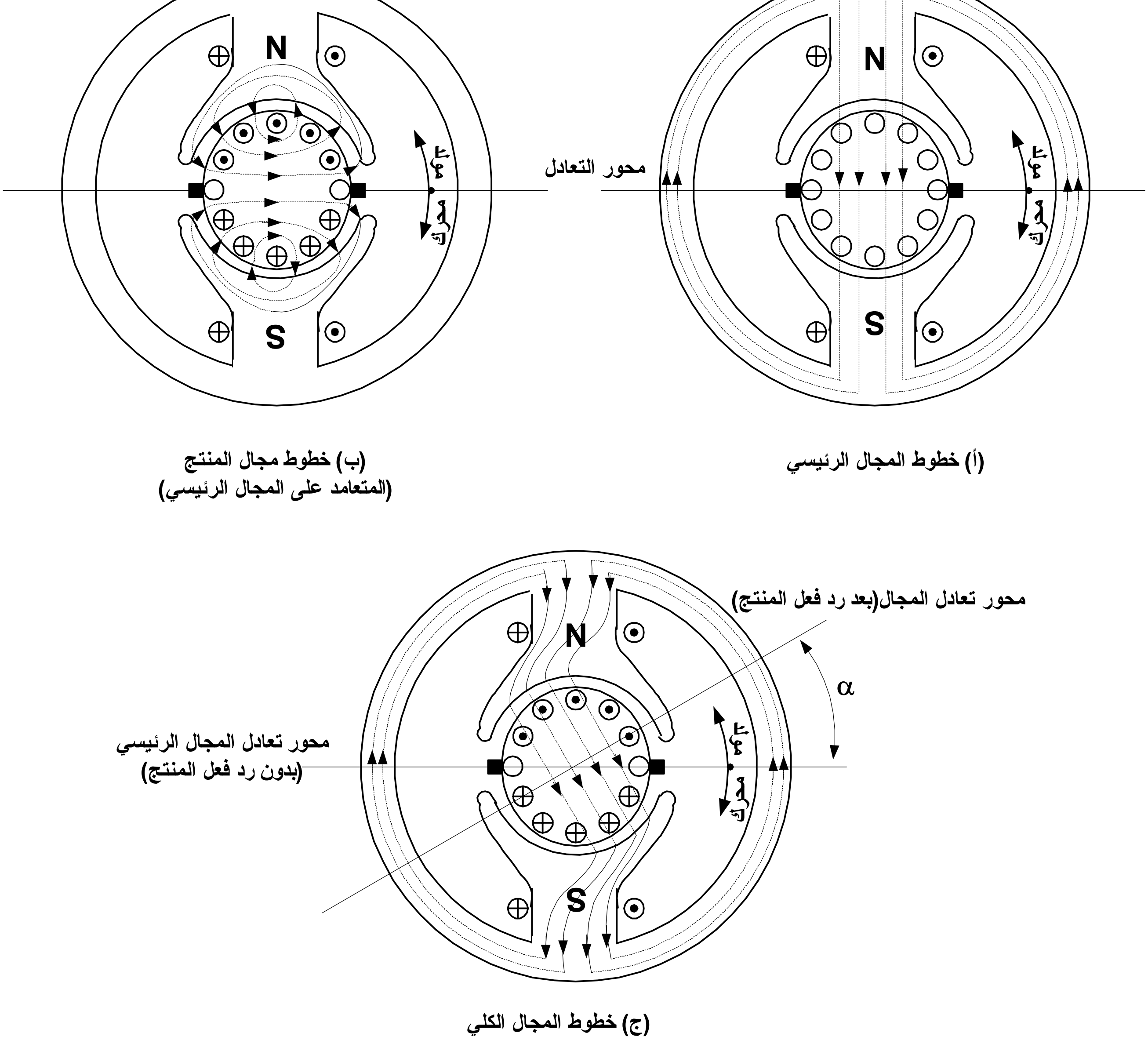
يولد تيار الإستثارة I_f المار في ملفات الثابت المتمركزة على الأقطاب عند اللاحمل مجالا مغناطيسيا رئيسيا ، تمر خطوط القوى لهذا المجال على عضو الاستنتاج أو المنتج (العضو الدائر) بصفة تناظرية من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي . مع العلم أن عند اللاحمل لا يمر تيار في ملفات المنتج$(I_a = 0)$ رغم أنه تتولد فيها القوة الدافعة الكهربائية $E_{a,0}$.

عندما يوصل المولد بالحمل يمر تيار الحمل في ملفات المنتج $(I_a = I_L)$ و بصفة مماثلة تسحب ملفات منتج المحرك تيارا من مصدر التغذية ، إذا عند التحميل يمر تيار في ملفات منتج آلة التيار المستمر سواء كانت مولدا أم محركا ، كل ما في الأمر يغير التيار اتجاهه في الملفات . هذا التيار يولد مجالا مغناطيسيا إضافيا

تمر خطوط قواه على محور متعامد على خطوط المجال الرئيسي و بالتالي يسمى بالمجال المتعامد للمنتج (armature quadrature axis field) الشكل (٤١،١) . المجال المغناطيسي الرئيسي الذي يولده تيار الاستثارة في ملفات الأقطاب و المجال المغناطيسي المتعامد للمنتج و الذي يولده التيار المار في ملفات المنتج عند التحميل يتفاعلان مع بعضهما البعض فينتجان مجالا مغناطيسيا كليا و جديدا للآلة ينحرف محوره عن محور التعادل للمجال المغناطيسي الأصلي(original neutral axis) بالزاوية α الأشكال (٤١،١) .

طبعا كلما كان الحمل على الآلة أكبر كان تيار المنتج عاليا مما يولد مجالا مغناطيسيا متعامدا أكبر و تبعا لذلك تكون زاوية انحراف محور التعادل α أكبر .

يسمى رد فعل المجال المغناطيسي المتعامد للمنتج علىمجال الأقطاب الرئيسي برد فعل عضو الاستنتاج (armature reaction) يتناسب إذا رد فعل عضو الاستنتاج مع تيار الحمل .



الشكل ٤١,١ : رد فعل المنتج

١,٢,٢- تغيير موضع الفرش :

في حالة وجود ملفات المنتج بين القطبين كما هو مبين في الشكل(٤١,١ ج) ،لا تتولد فيها أي ق.د.ك$(E_a = 0)$ ، الموضع المحلي لهذه الملفات و نقاط توصيلها مع قطع المبدل يسمى بموضع أو محور التعادل.

يجب إعادة ضبط موضع فرش آلة التيار المستمر بحيث تبقى متواجدة في منطقة التعادل . عندما يتغير موضع الفرش عن محور التعادل الأصلي بسبب رد فعل المنتج عند التحميل ، يحدث قصر دائرة لملفات عضو الاستنتاج عند تلامس الفرش لقطعتين من قطع المبدل في آن واحد و السبب هو أن القطعتين

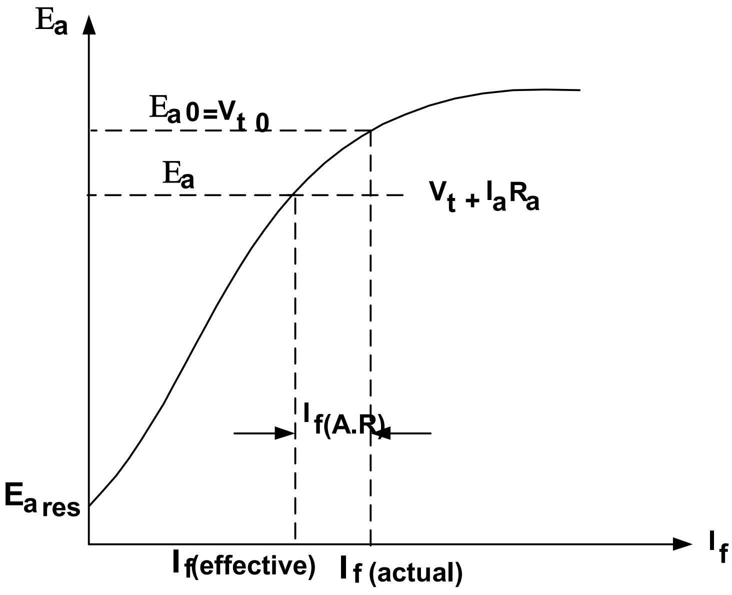
متصلتان بملفات تتولد فيها ق.د.ك التي أصبحت الآن متواجدة خارج منطقة التعادل . هذا الجهد المتولد ينتج تيارات قصر دائرة كبيرة تسبب في حدوث شرر بين الفرش و المبدل مما ينتج عنه أضرار جسيمة .

في حالة التحميل بالنسبة للمولد يحصل انحراف محول التعادل في اتجاه دوران العضو المتحرك لكن بالنسبة للمحرك و نتيجة لتغير اتجاه التيار في ملفات المنتج يتنقل محور التعادل في الاتجاه المعاكس لدوران العضو المتحرك . لذا و لتفادي حدوث شرر الفرش يجب إعادة ضبط موضعها بحيث تبقى متواجدة على محور التعادل ، هذا يستلزم تقديم موضع فرش المولدات في اتجاه الدوران بينما تؤخر فرش المحركات في الاتجاه المعاكس لدوران العضو المتحرك .

٣,٢,١ - إضعاف المجال المغناطيسي :

ليس رد فعل عضو الاستنتاج قاصرا على إنحراف محور التعادل بل له تأثيرات أخرى كثيرة . في الحقيقة ينقسم مجال رد فعل المنتج إلى مركبتين : مركبة أفقية و تكون عمودية على مجال الأقطاب و هي التي تسبب في إنحراف محور التعادل و مركبة رأسية و تعاكس مجال الأقطاب مما يسبب في إضعافه خاصة عندما تحدث ظاهرة التشبع . هذا التأثير المزيل للمغناطيسية لرد فعل عضو الاستنتاج يزيد بارتفاع تيارالمنتج عند التحميل .

عند اللاحمل $(I_a = I_L = 0)$ و الجهد على طرفي المولد يساوي الجهد المتولد $(V_{L,0} = E_{a,0})$. عندما يزيد تيار الحمل و إذا ما انخفض التدفق المغناطيسي بسبب رد فعل المنتج ، ينقص معه الجهد المتولد مما يسبب نقصان جهد الأطراف و الذي ينقص أيضا نتيجة لهبوط الجهد $(\downarrow E_a = k_a \Phi \downarrow w_m)$ الداخلي $I_a R_a$ حسب المعادلة $(\downarrow\downarrow V_L = \downarrow E_a - I_a \uparrow R_a)$.



الشكل ٤٢,١ : تأثير رد فعل المنتج

في الشكل (٤٢،١) الجهد المتولد لتيار مجال حقيقي $I_{f(actual)}$ هو $E_{a,0}$. عندما يمر تيار الحمل I_a يكون الجهد المتولد $E_a = V_L + I_a R_a$. إذا كان $E_a \langle E_{a,0}$ هبط التدفق المغناطيسي (مع افتراض أن السرعة تبقى ثابتة لا تتغير) بسبب رد فعل المنتج ، و هذا رغم أن تيار المجال الحقيقي $I_{f(actual)}$ لم يتغير في الشكل (٤٢،١) نلاحظ أن الجهد المتولد E_a ناتج عن تيار مجال فعلي $I_{f(effective)}$. يمكن إذا إعتبار رد فعل المنتج كنقصان في تيار المجال و بالتالي الفرق ما بين التيارين الحقيقي و الفعلي هو تيار المجال المكافئ لرد فعل المنتج :

$$I_{f(effective)} = I_{f(actual)} - I_{f(A.R)} \quad \text{أو} \quad I_{f(A.R)} = I_{f(actual)} - I_{f(effective)}$$

$I_{f(A.R)}$ هو تيار المجال المكافئ لرد فعل المنتج .

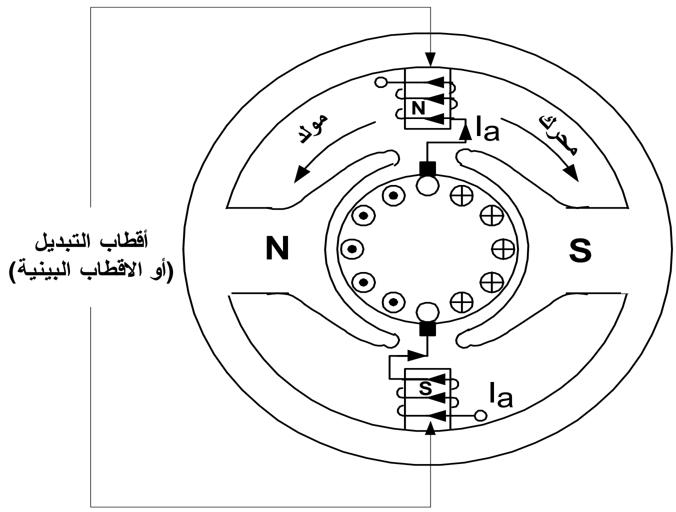
٤،٢،١ - أضرار رد فعل عضو الاستنتاج :

تتلخص أضرار عضو الاستنتاج فيما يلي :

- إضعاف المجال المغناطيسي للأقطاب مما يسبب في تقليل الق.د.ك و بالتالي انخفاض جهد الخرج على طرفي المولد .
- ارتفاع درجة الحرارة في عضو الاستنتاج لدرجة يخشى فيها على صهر المادة العازلة .
- حدوث شرر من وقت لآخر بين المبدل و الفرش بسبب انحراف محور التعادل عن موضعه الأصلي مما يستدعي تقديم الفرش دائما أثناء الدوران في اتجاه الدوران في المولدات و تأخيرها في الاتجاه المعاكس للدوران في المحركات لضبط الفرش على المحور الجديد .

٥،٢،١- طرق تعويض رد فعل عضو الاستنتاج :

١،٥،٢،١ - طريقة الأقطاب المساعدة (أقطاب التبديل):



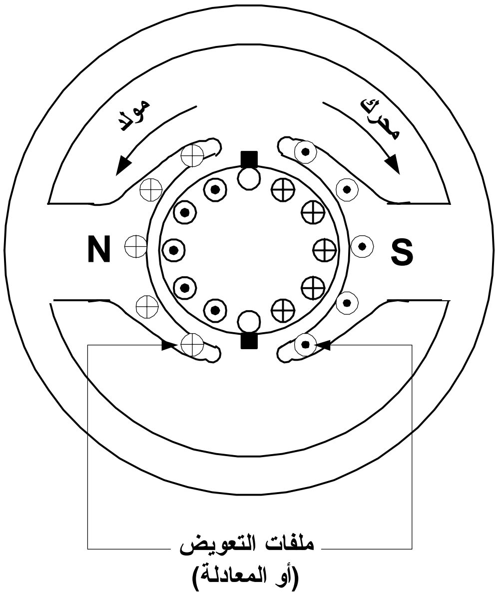
الشكل ٤٣،١ : تعويض رد فعل المنتج بالأقطاب المساعدة

وضع أقطاب مساعدة بين كل قطبين رئيسيين ، وظيفتها أن تعطي مجالا مغناطيسيا يضاد المركبة الأفقية لمجال المنتج و تعوضها في حالة حسن اختيار سعتها فلو كان المجالان متساويين و عكس بعضهما لأمكن إزالة تأثير رد فعل المنتج في منطقة التعادل و تبعا لذلك تخفيض الشرر ما بين المبدل و الفرش الناتج عن عكس تيار الملفات لحظيا عندما تمر على الفرش .

المركبة الأفقية لمجال المنتج متعلقة بتيار الحمل فإن المجال المغناطيسي للأقطاب المساعدة يجب أن يتعلق أيضا بتيار الحمل ، و بالتالي توصل ملفات الأقطاب المساعدة على التوالي مع ملفات عضو الاستنتاج و لكن بطريقة لف معاكسة .

في حالة المولد فإن القطب المساعد بقطبية مضادة يتبع القطب الرئيسي في اتجاه الدوران بينما في حالة المحرك القطب المساعد بنفس القطبية هو الذي يتبع القطب الرئيسي .

٢,٥,٢,١- طريقة الملفات الإضافية :

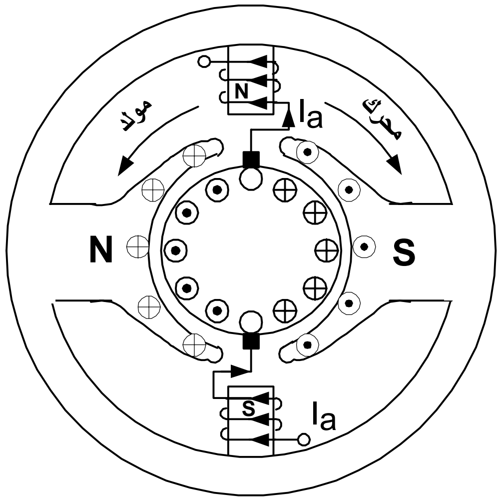


الشكل ٤٤,١ : تعويض رد فعل المنتج بالملفات الايضافية

المجال المغناطيسي للأقطاب المساعدة يعوض إلا المركبة الأفقية لمجال عضو الاستنتاج في اتجاه الأقطاب المساعدة لكن لا يقضي كلية على تأثير إزالة المغنطة عن الأقطاب الرئيسية و الناتج عن المركبة الرأسية لمجال المنتج مما يسبب في تشوه المجال و إضعافه تحت أوجه الأقطاب وحدوث الشرر بين المبدل و الفرش .
للتخلص من هذه المركبة الرأسية لمجال المنتج يوزع ملف إضافي في مجار على أوجه الأقطاب الرئيسية ترتب هذه الملفات الإضافية بحيث المجال المغناطيسي الناتج عنها يعاكس المركبة الرأسية لمجال المنتج لذا يجب أن يمر فيها تيار المنتج و بالتالي توصل على التوالي مع ملفات المنتج و بطريقة لف معاكسة أيضا

الملفات الإضافية مكلفة فهي لاتستخدم إلا في الآلات الكبيرة أو الآلات المعرضة لتغيرات مفاجئة لتيار المنتج و السرعة . الشكل (٤٤،١) يبين موضع الملفات الإضافية على الأقطاب الرئيسية .

بصفة مماثلة فإن الملفات الإضافية على وجه الأقطاب الرئيسية لا تقضي كلية على المركبة الأفقية لمجال المنتج في منطقة التعادل ، لذا كل من الأقطاب المساعدة و الملفات الإضافية اساسية لتحسين أداء آلة التيار المستمر . يستخدم كلاهما في آلة التيار المستمر المعاصرة .

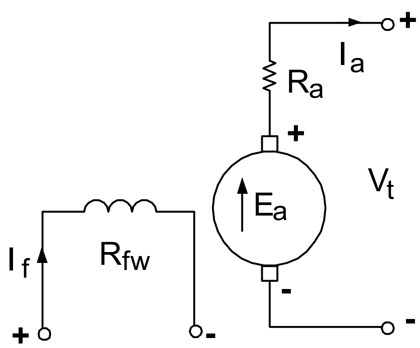


الشكل ٤٥،١ : تعويض رد فعل المنتج بالأقطاب المساعدة والملفات الاضافية

٣،٥،٢،١ - تكبير الثغرة الهوائية بين الأقطاب الرئيسية و عضو الاستنتاج

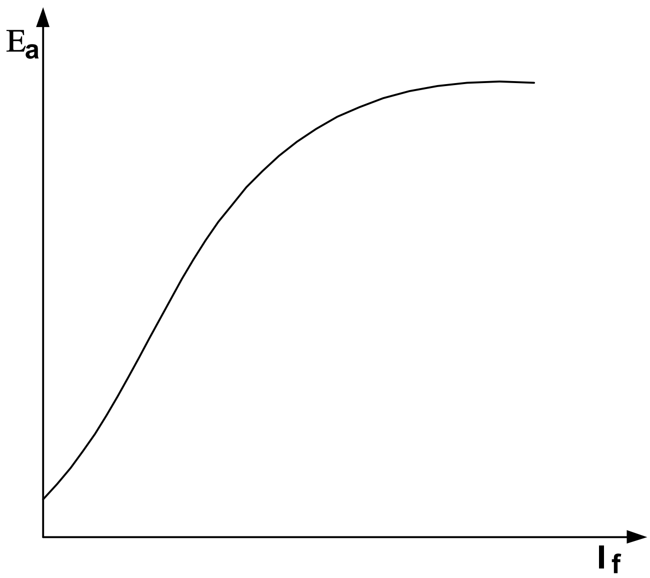
يتم ذلك بعمل مجاري رأسية في الأقطاب نفسها لتكبير المقاومة المغناطيسية أمام مجال المركبة الرأسية لمجال المنتج فيضعف تأثيرها .

٣،١ - خصائص مولد التيار المستمر ذي الاستثارة المنفصلة :



الشكل ٤٦،١ : مولد استثارة منفصلة عند اللاحمل

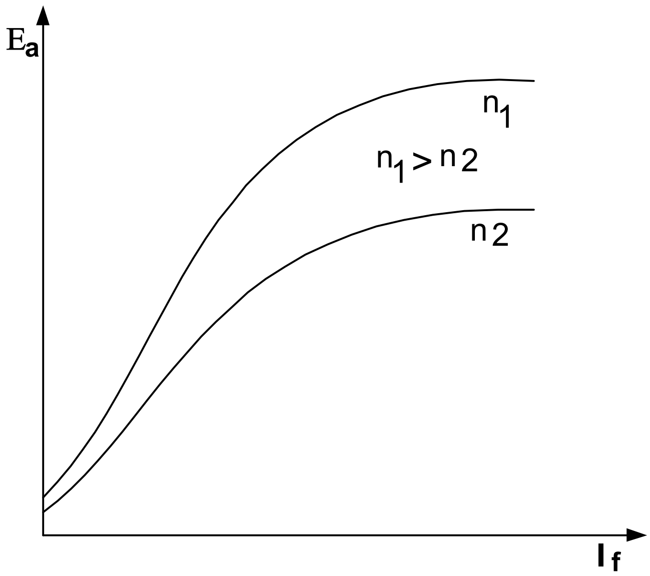
١,٣,١ - منحنى خاصية اللاحمل $V_{L,0}=E_{a,0}=f(I_f)$ عند سرعة ثابتة ، تيار مجال متغير و بدون حمل يكون تيار المنتج I_f يساوي صفرا $(I_a=I_L=0)$ بحيث تكون خاصية اللاحمل ممثلة في العلاقة $V_{L,0}=E_{a,0}=f(I_f)$ عند سرعة معينة .



الشكل ٤٧,١ : خاصية اللاحمل

المنحنى يوضح العلاقة بين E_a و I_f عند اللاحمل و منه نجد في حالة ما I_f يساوي صفرا فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة تكون لها قيمة نتيجة المغناطيسية المتبقية ، و بزيادة تيار المجال تزيد الق.د.ك خطيا إلى أن تحدث حالة التشبع بعدها تستقر الق.د.ك عند مقدار معين مهما زاد تيار المجال . نلاحظ أيضا أن قيم الق.د.ك المحصل عليها بزيادة تيار المجال أقل بقليل من تلك المحصل عليها بانخفاض تيار المجال و هذا تسببه ظاهرة هستريزيس (hysteresis) ، في معظم التطبيقات العملية نكتفي بالمنحنى المتوسط .

عند تيار استثارة معين و ثابت تكون الق.د.ك متناسبة مع سرعة الدوران حسب العلاقة $E_{a,0}=k_a\cdot\Phi\cdot w_m$ ، $w_m=2\pi\frac{n}{60}rds/\sec$ السرعة الزاوية و n عدد اللفات/دقيقة .و نحصل على عدة منحنيات اللاحمل بتغير سرعة الدوران (الشكل ٤٨,١).

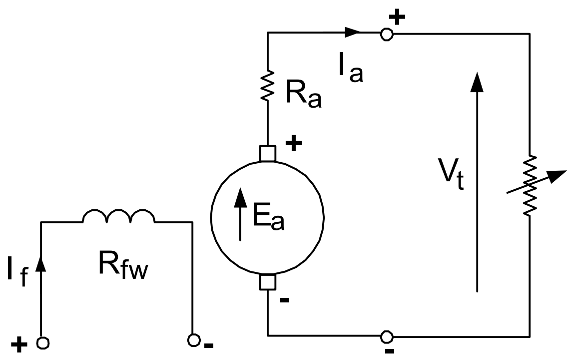


الشكل ٤٨,١ : تأثير السرعة على خاصية اللاحمل

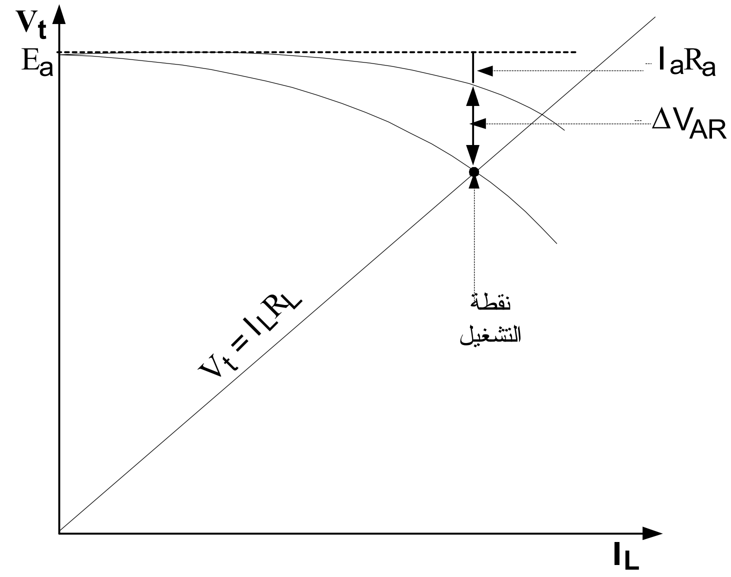
٢,٣,١ - **منحنى الخاصية الخارجية** $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة ، تيار مجال ثابت و تيار حمل متغير

إذا كانت سرعة المولد ثابتة $n = cons\tan t$ و تيار المجال I_f معين فإن الخاصية الخارجية و هي الجهد على الأطراف الخارجية للمولد V_L بدلالة تيار الحمل I_L و الذي يساوي في هذه الحالة تيار المنتج I_a .

قانون كرشوف لمجموع الجهود حول الحلقة يعطي : $V_L = E_{a,0} - \Delta V_{A.R} - I_a R_a$



الشكل٤٩,١ : مولد استثارة منفصلة عند التحميل



الشكل٥٠,١ : الخاصية الخارجية لمولد الاستثارة المنفصلة

عند تزايد تيار الحمل ، الجهد على طرفي المولد ينخفض خطيا بسبب الهبوط في الجهد في مقاومة المنتج $I_a R_a$ (نفترض أن E_a تبقى ثابتة) ، هذا الهبوط في الجهد يكون في الحقيقة ضعيفا لأن مقاومة دائرة المنتج R_a صغيرة . لذا فإن الجهد على طرفي مولدالتيار المستمر بإثارة منفصلة و عند الحمل يكون تقريبا ثابتا . عند قيم عالية لتيار المنتج يحصل هناك هبوط آخر $\Delta V_{A.R}$ في جهد المولد ، يكون ناتجا عن ما يسمى برد فعل المنتج الذي له تأثير إزالة المغناطيسية مما يسبب انحراف المنحنى عن علاقته الخطية ، يمكن إهمال هذا التأثير لقيم تيار المنتج عند الحمل أقل من القيمة الاسمية .

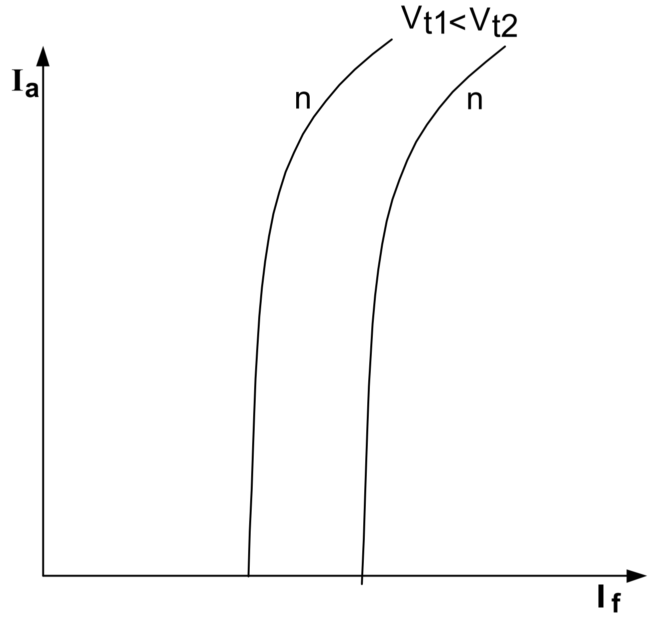
أهمية الخاصية الخارجية تكمن في تحديد التشغيل عند التحميل على أي جهاز استقبال معروف (أنظر٤,١)

قياس الجهد عند اللاحمل $E_{a,0}$ و الجهد عند التحميل V_L و باستثارة ثابتة وسرعة معينة يسمح بحساب مجموع الهبوطين $\Delta V_{A.R} + I_a R_a = E_a - V_L$. قياس مقاومة دائرة المنتج R_a يسمح بحساب الهبوط في الجهد الناتج عنها $I_a R_a$ بعدها يكون من السهل الفصل بين الهبوطين و حساب الهبوط في الجهد $\Delta V_{A.R}$ الناتج عن رد فعل المنتج .

٣,٣,١ - خاصية التحكم $I_a = f(I_f)$ عند سرعة ثابتة و جهد خرج معين :

نتحصل على منحنى خاصية التحكم $I_a = f(I_f)$ بتغيير تيار الإستثارة I_f و قياس تيار المنتج I_a عند سرعة دوران ثابتة و لقيمة جهد الخرج V_L معينة .

هذه الخاصية مهمة في حالة أن جهاز الاستقبال يتطلب جهداً ثابتاً للتشغيل الصحيح .



الشكل٥١،١ : خاصية التحكم لمولد الاستثارة المنفصلة

٤،٣،١ - خصائص أخرى :

هناك خصائص أخرى ممكنة لدراسة المقادير الكهربائية :

- ❖ $V_L = f(n)$ لقيم I_L و I_f معينة
- ❖ $I_a = f(n)$ لقيم V_L و I_f معينة
- ❖ $V_L = f(I_f)$ لقيم I_L و n معينة ، هذه الخاصية بتيار تحميل ثابت و تكون حالتها الاستثنائية خاصية اللاحمل .

٤،١ - تحديد نقطة التشغيل :

إن مولد التيار المستمر هو مثال للمولد الكهربائي ، فهو مصدر جهد يتحكم فيه مقدار كهربائي (هو تيار استثارته) و مقدار ميكانيكي (هو سرعة تدوير عضوه الدائر) . توصل الأطراف الخارجية للمولد لحمل كهربائي (جهاز استقبال طاقة كهربائية) . لتعيين نقطة تشغيل المولد مع دائرة الحمل يكون للمسألة مجهولان هما V_L و I_L سواء من جهة المولد أو من جهة الحمل . يستعمل الحل البياني لعدم خطية الخاصية الخارجية . في المستوي(V,I) نرسم خاصية الحمل ($V_L = I_L R_L$) ثم الخاصية الخارجية $V_L = E_{a,0} - \Delta V_{A.R} - I_a R_a$ للآلة تحت الشروط المعينة للاستثارة و السرعة ، نقطة التقاطع ما بين المنحنيين تعين نقطة التشغيل أي قيمتي الجهد الخارجي V_L و تيار الحمل I_L . على العموم تكون هناك

نقطة واحدة عند التشغيل المستقر . يجب التحقيق من أن سرعة المولد عند هذا التحميل هي السرعة المطلوبة .

٥،١ - التحكم في جهد خرج المولد ذي الاستثارة المنفصلة :

يمكن التحكم في جهد خرج المولد ذي الاستثارة المنفصلة بتغيير الجهد الداخلي المتولد E_a في الآلة . من معادلة الجهود $V_L = E_a - I_a R_a$ يمكن الملاحظة أنه إذا تزايدت E_a ستزيد تبعا لها V_L و كذلك إذا تناقصت E_a سيتناقص معها V_L . كون الجهد المتولد يعطى بالمعادلة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ فإن هناك طريقتان للتحكم في جهد خرج هذا المولد .

١،٥،١ - تغيير سرعة الدوران w_m

إذا زادت سرعة التدوير w_m تزيد E_a و بالتالي يزيد أيضا الجهد على طرفي المولد V_L

٢،٥،١ - تغيير تيار الاستثارة I_f

إذا انخفضت مقاومة دائرة المجال R_f يزيد تيار الاستثارة تبعا لقانون أوم $I_f = \dfrac{V_f}{R_f}$ حيث V_f مصدر جهد مستمر منفصل يغذي ملفات المجال ، فيتولد تدفق مغناطيسي Φ أكبر . وعندما يزيد هذا الأخير يرفع معه الجهد المتولد E_a و بالتالي يزيد جهد الأطراف V_L حسب العلاقات السابقة .

في كثير من التطبيقات العملية مجال تغير سرعة الآلة المحركة للمولد يكون محدودا لذا طريقة التحكم في جهد أطراف المولد الأكثر شيوعا هي بواسطة تغير تيار الاستثارة .

٦،١ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى :

مولد تيار مستمر من نوع الاستثارة المنفصلة يدور عند سرعة 1200 لفة/دقيقة و يغذي حملا ثابت المقاومة بتيار قدره 200 A عند جهد 125 V ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.04 Ω . يمكن افتراض أن رد فعل المنتج مهملا .

١ - احسب :

(أ) القوة الدافعة الكهربائية

(ب) مقاومة الحمل

٢ - إذا انخفضت الآن السرعة إلى 1000 لفة/دقيقة و مع اعتبار عدم تغير تيار المجال ، أوجد :

(أ) القوة الدافعة الكهربائية الجديدة

(ب) التيار الجديد الذي يغذي به المولد الحمل .

الحل :

١ - (أ) معادلة الجهود لمولد التيار المستمر باستثارة منفصلة و في حالة رد فعل المنتج مهمل هي :

$E_a = V_L + I_a R_a$ أو $V_L = E_a - I_a R_a$

جهد خرج المولد $V_L = 125V$ ، مقاومة المنتج $R_a = 0.04\Omega$ و تيار المنتج = تيار الحمل $(I_a = I_L = 200A)$

لذا القوة الدافعة الكهربائية المتولدة $E_a = 125 + 200 \times 0.04 = 133V$

(ب) تحسب مقاومة الحمل R_L من قانون أوم $V_L = I_L R_L$ إذا $R_L = \dfrac{V_L}{I_L}$ أو $R_L = \dfrac{125}{200} = 0.625\Omega$

٢ - تنخفض السرعة الآن إلى 1000 لفة / دقيقة و مع ثبات تيار المجال :

(أ) تعطى السرعة الأصلية بالمعادلة $E_{a1} = k_a \cdot \Phi \cdot w_{m1}$ حيث $w_{m1} = 2\pi \times \dfrac{n_1}{60}$ السرعة الزاوية و n_1 عدد اللفات لكل دقيقة ، السرعة الجديدة $E_{a2} = k_a \cdot \Phi \cdot w_{m2}$ مع $w_{m2} = 2\pi \times \dfrac{n_2}{60}$ و n_2 السرعة الجديدة ،

يمكن كتابة النسبة التالية $\dfrac{E_{a2}}{E_{a1}} = \dfrac{k_a \Phi \dfrac{2\pi \times n_2}{60}}{k_a \Phi \dfrac{2\pi \times n_1}{60}} = \dfrac{n_2}{n_1}$ ما دام k_a و Φ ثابتين .

لذا تكون القوة الدافعة الكهربائية الجديدة $E_{a2} = E_{a1} \times \dfrac{n_2}{n_1} = 133 \times \dfrac{1000}{1200} = 110.8V \cong 111V$

(ب) تيار الحمل الجديد : $V_{L2} = E_{a2} - I_{a2} R_a$ و $V_{L2} = I_{a2} R_L$ هذا يعطي $I_{a2} R_L = E_{a2} - I_{a2} R_a$

يمكن استنتاج إذا $I_{a2} = \dfrac{E_{a2}}{R_a + R_L} = \dfrac{111}{0.04 + 0.625} = 166.9 \cong 167A$

المسألة الثانية :

لمولد تيار مستمر ذي استثارة منفصلة (20 Kw ، 200 A ، 1800 لفة/دقيقة) مقاومة ملفات المنتج 0.1 Ω ، مقاومة ملفات المجال 133 Ω و مقاومة التحكم في المجال R_{fc} التي تتغير قيمتها ما بين 0 و 95.5 Ω . تغذى ملفات المجال من مصدر جهد مستمر 200 V .

خاصية اللاحمل عند السرعة 1200 لفة/دقيقة لهذا المولد تعطى في الجدول الموالي :

$I_f(A)$	0.00	0.375	0.50	0.75	0.875	1.00	1.125	1.25	1.50	1.75
$E_a(V)$	5.0	33.5	67.0	134.0	160.0	175.0	190.0	200.0	214.0	223.0

١ - أوجد القيمتين العظمى و الدنيا $E_{a\max}$ و $E_{a\min}$ لجهد أطراف هذا المولد عند اللاحمل .

٢ - تضبط مقاومة التحكم في المجال (R_{fc}) حتى يعطي المولد جهد 200V ، احسب :

١,٢ - قيمة R_{fc}

٢,٢ - جهد أطراف المولد عند الحمل الكامل (التيار الاسمي الذي يمر في المنتج) وذلك في الحالتين :

١,٢,٢ - بدون رد فعل المنتج

٢,٢,٢ - عند رد فعل المنتج مكافئ لتيار مجال $I_{f(A.R)} = 0.125A$

الحل :

- القوة الدافعة الكهربائية تعطى بالعلاقة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ و تكون لها قيمة قصوى إذا كان للتدفق المغناطيسي قيمة قصوى أي إذا كان لتيار المجال قيمة قصوى ، $I_f = \dfrac{V_f}{R_{fc} + R_{fw}}$ وهذا يستلزم $R_{fc} = 0$

لذا $I_f = \dfrac{200}{133} = 1.5A$ و القيمة المناظرة له من الجدول $E_{a\max} = 214V$.

و تكون للق.د.ك قيمة دنيا إذا كان لتيار المجال قيمة دنيا أي $R_{fc} = 95.5\Omega$ مما يعطي $I_f = \dfrac{200}{95.5 + 133} = 0.875A$ و القيمة المناظرة له من الجدول $E_{a\min} = 160V$.

٢ - عند اللاحمل $I_a = I_L = 0$ ، $V_{L,0} = E_a - I_a R_a = E_a = 200V$ و من الجدول تيار المجال المناظر لها $I_f = 1.25A$.

١,٢ - حساب مقاومة التحكم في المجال R_{fc} :

$R_{fc} + R_{fw} = \dfrac{V_f}{I_f}$ و بتعويض قيم V_f ، I_f و R_{fw} نتحصل على قيمة R_{fc}

لذا $R_{fc} + 133 = \dfrac{200}{1.25}$ ، $R_{fc} + 133 = 160$ أو $R_{fc} = 27\Omega$.

٢,٢ - حساب جهد خرج المولد عند الحمل الكامل $V_{L(full-load)}$:

تيار المنتج الاسمي = قدرة المنتج الاسمية / الجهد الاسمي I_a (rated current) = P_a (rated)/V_L (rated)

$I_{a(F.L)} = \dfrac{20000}{200} = 100A$.

١,٢,٢ - بدون رد فعل المنتج ، تيار مجال $I_f = 1.25A$ و ق.د.ك $E_a = 200V$ يكون جهد خرج المولد عند الحمل الكامل $V_{L(F.L)} = E_a - I_{a(F.L)} R_a$ ، $V_{L(F.L)} = 200 - 100 \times 0.1$ أو $V_{L(F.L)} = 190V$

٢,٢,٢ - عند رد فعل المنتج مكافئ لتيار مجال $I_{f(A.R)} = 0.125A$ ، يكون تيار المجال الفعلي :

$I_{f(eff)} = I_{f(act)} - I_{f(A.R)}$ ، $I_{f(eff)} = 1.25 - 0.125 = 1.125A$ ، من الجدول نتحصل على قيمة الق.د.ك الفعلية المناظرة لتيار المجال الفعلي ، $E_{a(eff)} = 190V$ ، لذا يكون جهد خرج المولد عند الحمل الكامل و رد فعل المنتج $V_{L(F.L)} = E_{a(eff)} - I_{a(F.L)} R_a$ ، $V_{L(F.L)} = 190 - 100 \times 0.1$ أو $V_{L(F.L)} = 180V$

٢ - مولدات الاستثارة الذاتية :

في هذه الطريقة تغذي الآلة نفسها ملفات مجالها بالتيار المستمر و هذا لا يكون ممكنا إلا بعدما يتم تدوير عضو الاستنتاج و وجود المغناطيسية المتبقية Φ_{res} في أقطاب الآلة . فإن كانت آلة جديدة خارجة من المصنع لأول مرة تدار الآلة و تغذى ملفات مجالها بتيار استثارة خارجي لتوليد المغناطيسية المتبقية الضرورية للإستثارة الذاتية . و تبعا لطريقة توصيل ملفات المجال بدائرة المنتج تنقسم مولدات الاستثارة الذاتية إلى :

١,٢ - مولد التوازي

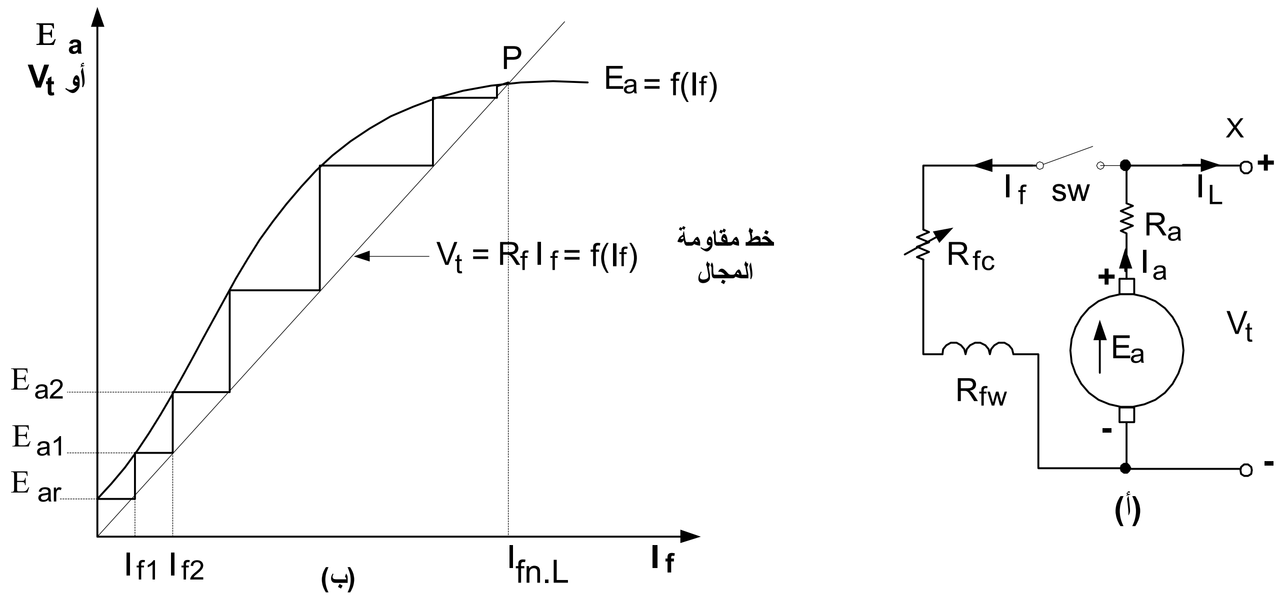
في هذا النوع من المولدات توصل ملفات المجال مباشرة على التوازي مع ملفات المنتج بحيث يغذي الجهد المتولد في المنتج ملفات المجال بتيار الإستثارة I_f تحت بعض الشروط المعينة و التي سيتم مناقشتها هنا حتى ينتج المولد على طرفيه الجهد المرغوب فيه .

تكون الدائرة المكافئة لمولد التوازي عند اللاحمل كالآتي : (الشكل ٥٢,١ أ)

إذا كانت الآلة لازم أن تشتغل كمولد استثارة ذاتية يجب أن تحتوي دائرتها المغناطيسية على المغناطيسية المتبقية Φ_{res} من تشغيل سابق .

الشكل ٥٢,١ ب يوضح منحنى التمغنط لآلة تيار مستمر و يبين الشكل أيضا جط المقاومة الحرجة والذي هو الرسم البيني للجهد $V_L = I_f R_f$

١,١,٢ - شرح مبسط لعملية تركيب الجهد في مولد الاستثارة الذاتية :



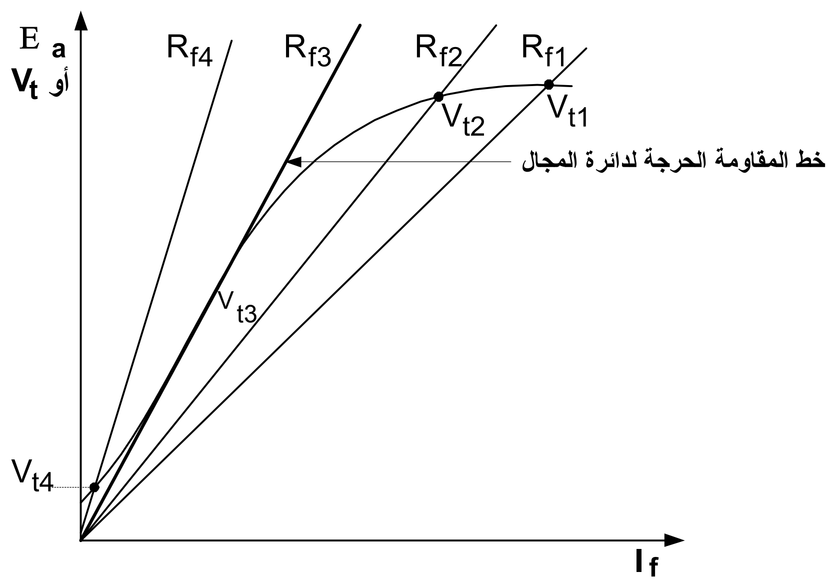
الشكل ٥٢,١ : تركيب جهد مولد الاستثارة الذاتية

لنفترض أن دائرة المجال غير متصلة أصلا مع دائرة المنتج ، هذا الأخير الذي يدار بسرعة معينة ، يظهر جهد صغير E_{ar} على طرفي المنتج نتيجة للمغناطيسية المتخلفة في الآلة . إذا الآن أغلقنا المفتاح SW بعدما يتم توصيل دائرة المجال على التوازي مع دائرة المنتج ، سيمر تيار في ملفات المجال . إذا ساعدت القوة الدافعة المغناطيسية لهذا التيار (أو التدفق المغناطيسي الناتج عنها) المغناطيسية المتخلفة في الآلة سيمر التيار I_{f1} في دائرة المجال .

من منحنى التمغنط إذا ما مر التيار I_{f1} في دائرة المجال ، الجهد المتولد سيكون E_{a1} لكن الجهد على طرفي المنتج هو $V_L = I_{f1}R_f \langle E_{a1}$. الجهد المتولد في المنتج E_{a1} سيزيد في قيمة تيار المجال إلى القيمة I_{f2} و الذي بدوره سيزيد في جهد المنتج إلى القيمة E_{a2} . عملية تركيب الجهد هذه ستتواصل .

يعطى الجهد على طرفي المنتج بالعلاقتين : $V_L = E_a - I_a R_a$ و $V_L = I_f R_f$ ، إذا ما أهملنا الهبوط في الجهد $I_a R_a$ (لأن $R_a \rangle\rangle R_f$) سيتركب الجهد إلى القيمة المعطاة بتقاطع منحنى التمغنط و خط مقاومة المجال (الشكل ٥٢,١ ب) أي $E_a = I_f R_f = V_L$ ، بعدها لا يمكن الحصول على أي فائض في الجهد بزيادة أكبر لتيار المجال I_f . في الواقع التطبيقي تغيرات I_f و E_a تحصل آنيا و يتبع الجهد في تركيبه تقريبا منحنى التمغنط بدلا ما يتسلق السلم .

الشكل (٥٣,١) يبين تركيب الجهد المتولد في مولد تيار مستمر بإستثارة ذاتية لقيم متعددة لمقاومة دائرة المجال .



الشكل ٥٣,١ : المقومة الحرجة لمولدات الاستثارة الذاتية

عند القيمة المعينة R_{f3} لدائرة المجال ، يكون خط مقاومة المجال تقريبا متطابقا مع الطرف الخطي لمنحنى التمغنط . هذا التطابق في المنحنيين ينجر عنه حالة جهد غير مستقرة و تسمى هذه المقاومة بالمقاومة الحرجة لدائرة المجال (critical field circuit resistance) . أي مقاومة لدائرة المجال أكبر من هذه القيمة الحرجة ، R_{f4} تعطي جهدا V_{L4} صغيرا جدا غير ملحوظ .و من جهة ثانية إذا كانت مقاومة دائرة المجال أصغر من القيمة الحرجة ، R_{f1} أو R_{f2} مثلا ، سيتولد جهد V_{L1} أو V_{L2} أكبر .

للخلاصة ، يجب تحقيق ثلاثة شروط لتركيب الجهد في مولدات التيار المستمر ذات الاستثارة الذاتية :

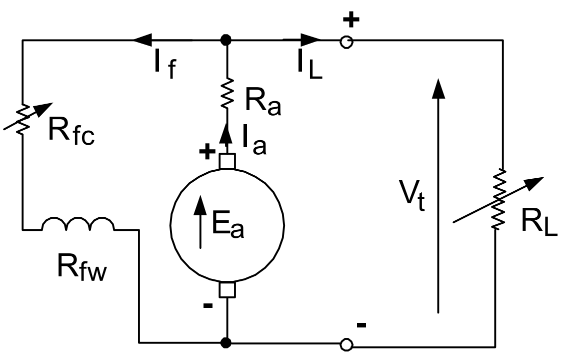
(أ) يجب أن تحتوي الدائرة المغناطيسية للآلة على التدفق المغناطيسي المتبقي Φ_{res} .

(ب) يجب أن تساعد القوة الدافعة المغناطيسية $F = N_f I_f$ لملفات المجال (أو التدفق المغناطيسي Φ الناتج عنها) المغناطيسية المتبقية .

(ج) يجب أن تكون مقاومة دائرة المجال أقل من قيمتها الحرجة .

٢,١,٢ - المعادلات التي تتحكم في تشغيل مولدات التيار المستمر ذي الاستثارة توازي

تكون الدائرة المكافئة لمولد التوازي عند الحمل كالآتي :



الشكل٥٤,١ : مولد استثارة توازي عند التحميل

المعادلات التي تصف لنا تشغيل المولد التوازي في الحالة المنتظمة و المستقرة عند الحمل هي :

$$V_L = E_{a,0} - I_a R_a - \Delta V_{A.R} \qquad (٣٦,١)$$

$$E_{aeff} = E_{a,0} - \Delta V_{A.R} \qquad (٣٧,١)$$

$$I_{f(eff)} = I_{f(act)} - I_{f(A.R)} \qquad (٣٨,١)$$

$$V_L = I_f (R_{fw} + R_{fc}) = I_f R_f \qquad (٣٩,١)$$

$$V_L = I_L R_L$$

$$I_a = I_f + I_L \qquad (٤٠,١)$$

$$P_{out} = V_L I_L$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$$

$$\sum P_{losses} = P_{cu} + P_{iron} + P_m$$

$$P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a$$

ملاحظة : من وجهة نظر دقيقة فإن الهبوط في الجهد $\Delta V_{A.R}$ الناتج عن رد فعل المنتج يمثل مصدر جهد غير خطي ،يتحكم فيه التيار I_a و يعاكس الق.د.ك $E_{a,0}$ عند اللاحمل الغير خطية أيضا و المتحكم فيهاالتيار I_f . هذا الهبوط في الجهد متناسب مع السرعة .

٣,١,٢ - **الخاصية الخارجية** $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة،مقاومة دائرة المجال ثابتة و تيار حمل متغير

الخاصية الخارجية لمولد التوازي تختلف عن نظيرتها لمولد الاستثارة المنفصلة بسبب أن مقدار تيار المجال في المولد التوازي متعلق بالجهد على طرفي المنتج (جهد الحمل) V_L . لفهم الخاصية الخارجية لمولد التوازي نلاحظ ماذا يحصل للآلة من حالة اللاحمل إلى زيادات متتالية للتحميل آخذين بالحسبان قانون كرشوف

١,٣,١,٢ - الخاصية الخارجية بدون رد فعل المنتج

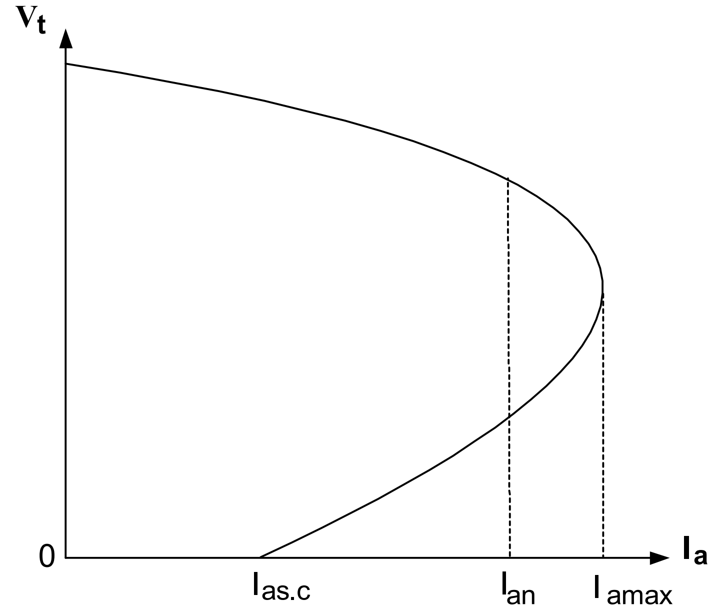
في البداية نفترض أن رد فعل المنتج مهملا: $V_L = E_{a,0} - I_a R_a$

بدون حمل $I_L = 0$ و $V_L = E_{a,0}$ حيث $E_{a,0}$ هي الق.د.ك المتولدة عند اللاحمل .

عندما يزيد الحمل على المولد يزيد تيار الحمل I_L و تبعا لذلك يزيد تيار المنتج $I_a \uparrow = I_f + I_L \uparrow$. هذه الزيادة في I_a تزيد في هبوط الجهد الداخلي $I_a R_a$ مسببا في انخفاض في الجهد على طرفي المولد $\downarrow V_L = E_{a,0} - I_a \uparrow R_a$ ، في الحقيقة هذا ما نلاحظه أيضا في مولد الاستثارة المنفصلة ، إلا أن في مولد التوازي عندما ينخفض الجهد V_L ينخفض معه تيار المجال $\left(\downarrow I_f = \frac{V_L \downarrow}{R_f}\right)$ ، طبعا هذا يؤدي بنقصان التدفق المغناطيسي في الآلة $\left(\downarrow \Phi = \frac{N I_f \downarrow}{R_m}\right)$ مما يخفض الجهد المتولد $\downarrow E_a = k_a \Phi \downarrow w_m$.

الإنخفاض في E_a يسبب هبوطا زائدا في الجهد على طرفي المنتج $\downarrow\downarrow V_L = E_a \downarrow - I_a R_a$.

الخاصية الخارجية المحصل عليها إذا ممثلة في الشكل (٥٥,١) .



الشكل ٥٥,١ : الخاصية الخارجية لمولد توازي

الشكل (٥٥,١) يوضح أنه في حالة اللاحمل يكون الجهد على طرفي المولد مساوياً للق.د.ك المتولدة $E_{a,0}$ لكن سرعان ما يهبط هذا الجهد نتيجة لهبوط الجهد الداخلي من جهة و لإضعاف المجال المغناطيسي من جهة ثانية كما سبق شرحه . إذا كانت $R_L = 0$ ، $V_L = I_L R_L = 0$ مما يعطي $I_{a(S.C)} = I_L \cong \frac{E_{ar}}{R_a}$.

من الواضح أيضا أن انخفاض الجهد على طرفي مولد التوازي مع تيار المنتج أسرع على ما هو عليه في مولد الاستثارة المنفصلة ، السبب هو أن في مولد التوازي (استثارة ذاتية) عندما يهبط جهد الأطراف عند زيادة الحمل ينخفض معه أيضا تيار المجال مما ينتج عنه جهد متولد أقل بينما في مولد الاستثارة المنفصلة تيار المجال و بالتالي الجهد المتولد غير متأثرين بالحمل .

٢,٣,١,٢ - الخاصية الخارجية عند رد فعل المنتج

عندما يمر التيار I_a في ملفات المنتج يسبب هبوط في الجهد $I_a R_a$ و في حالة حدوث رد فعل المنتج يكون تأثيره هو محاولة إزالة المغناطيسية على الأقطاب أي ينخفض التدفق المغناطيسي في الدائرة المغناطيسية ، مما ينتج عنه هبوط آخر في جهد الأطراف $\Delta V_{A.R}$ كما هو مبين في الشكل (٥٥,١) .

٤,١,٢ - التحكم في جهد خرج مولد التوازي

كما كان الشأن بالنسبة لمولد الاستثارة المنفصلة فإن هناك طريقتين للتحكم في جهد خرج مولد التوازي :

١,٤,١,٢ - تغيير سرعة عمود إدارة المولد w_m

٢,٤,١,٢ - تغيير مقومة دائرة المجال R_f : يتم توصيل مقاومة متغيرة R_{fc} على التوالي مع ملفات المجال فيمكن بواسطتها تقليل أو زيادة الجهد المتولد .

إن تغيير مقاومة دائرة المجال هي الطريقة الرئيسية للتحكم في جهد خرج المولد التوازي V_L . إذا انخفضت مقاومة دائرة المجال R_f ، $\left(R_f = R_{fw} + R_{fc}\right)$ ، R_{fw} مقاومة ملفات المجال ، R_{fc} المقاومة المتغيرة ، يزيد تيار المجال $\uparrow I_f = \frac{V_L}{R_f \downarrow}$ و عندما يزيد هذا الأخير ، يزيد تبعا له التدفق المغناطيسي Φ في الآلة مسببا بذلك ارتفاع الجهد الداخلي $\uparrow E_a = k_a \Phi \uparrow w_m$ و الآن إرتفاع E_a يسبب أيضا ارتفاع الجهد على طرفي المولد $\uparrow V_L = \uparrow E_a - I_a R_a$ و العكس صحيح .

٥,١,٢ - استخدام مولد التوازي :

١,٥,١,٢ - يستخدم في المجالات التي تتطلب جهدا تقريبا ثابتا ومنها شحن البطاريات .

٢,٥,١,٢ - في محطات القوى الكهربائية .

٣,٥,١,٢ - يغذي أقطاب مولدات التيار المتردد المتزامنة .

٤,٥,١,٢ - يغذي أجهزة التسخين و الإنارة .

٦,١,٢- مسائل محلولة :

المسألة الأولى :

عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر توازي ملفوف لفا تموجيا ، يعطي تيار $100A$ ، له 200 موصل و يدور بسرعة 500 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار فيضه 0.025 Wb ، للمولد 4 أقطاب .

مقاومة ملفات عضو الاستنتاج $0.1\ \Omega$ و مقاومة ملفات المجال $80\ \Omega$. إذا كانت المفاقيد الحديدية والميكانيكية تساوي 1660 W و مع إهمال رد فعل المنتج ، احسب ما يلي :

١ - القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة

٢ - الجهد على الأطراف الخارجية للمولد

٣ - تيار المجال

٤ - تيار الحمل

٥ - القدة التي يعطيها المولد للخرج (قدرة خرج المولد)

٦ - الفقد النحاسي

٧ - الكفاءة

الحل :

١ - القوة الدافعة المغناطيسية E_a تعطى بالعلاقة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$

ثابت الآلة $k_a = \frac{ZP}{2\pi A} = \frac{264 \times 4}{2\pi \times 2} = 84.03$ ، $A = 2$ (عدد دوائر المنتج) لأن اللف تموجي

التدفق المغناطيسي لكل قطب $\Phi = 0.025Wb$

السرعة الزاوية $w_m = 2\pi \times \frac{n}{60} = 2\pi \times \frac{500}{60} = 52.36 rd/\sec$

لذا تكون القوة.د.ك المتولدة في المنتج $E_a = 84.03 \times 0.025 \times 52.36$ أو $E_a = 110V$

٢ - الجهد على الأطراف الخارجية لمولد التوازي V_L

$V_L = E_a - I_a R_a$ ، $V_L = 110 - 100 \times 0.1$ أو $V_L = 100V$

٣ - تيار المجال I_f

$I_f = \frac{V_L}{R_{fw}}$ ، $I_f = \frac{100}{80}$ أو $I_f = 1.25A$

٤ - تيار الحمل I_L

$I_L = I_a - I_f$ ، $I_L = 100 - 1.25$ أو $I_L = 98.75A$

٥ - القدرة التي يعطيها المولد للحمل P_{out}

$P_{out} = V_L \times I_L$ ، $P_{out} = 100 \times 98.75$ أو $P_{out} = 9875W$

٦ - الفقد النحاسي P_{cu}

$P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a$ ، $P_{cu} = (1.25)^2 \times 80 + (100)^2 \times 0.1$ أو $P_{cu} = 1125W$

٧ - الكفاءة $\eta\%$

$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$ ، $\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}$ ،

$\eta\% = \frac{9875}{9875 + 1660 + 1125} \times 100$ أو $\eta\% = 78\%$

المسألة الثانية :

الجهد الاسمي لآلة تيار مستمر 100 V ، مقاومة ملفات المنتج 0.1Ω ، مقاومة ملفات المجال $80\ \Omega$. منحنى التمغنط عند السرعة 1000 لفة/دقيقة مبين في الشكل ( ) . تعمل الآلة كمولد تيار مستمر توازي عند اللاحمل و عند سرعة 1000 لفة/دقيقة و بافتراض أن القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة تساوي الجهد الاسمي عند اللاحمل ، احسب :

١ - القيمة القصوى للجهد المتولد

٢ - قيمة مقاومة التحكم في المجال R_{fc} اللازمة لتوليد الجهد الاسمي 100 V

٤ - قيمة مقاومة دائرة المجال الحرجة $R_{f(crit)}$ و قيمة R_{fc} التابعة لها

الحل :

١ - تتولد القيمة القصوى لجهد المنتج $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ عند القيمة القصوى للتدفق المغناطيسي Φ أي لتيار المجال $I_f = \dfrac{V_L}{R_{fc} + R_{fw}}$ و هذا يكون عند القيمة الدنيا لمقاومة التحكم في المجال ، $R_{fc} = 0$.

نرسم خط مقاومة المجال $V_L = R_{fw} I_f$ أو $V_L = 80 I_f$ ، $R_f = R_{fw} = 80\Omega$.

$V_L = E_a - I_a R_a \cong E_a$ لأن إذا كانت $R_a \prec\prec R_f$ يكون هبوط الجهد في مقاومة المنتج مهملا .

القيمة القصوى للجهد المتولد عند تقاطع منحنى التمغنط $E_a = f(I_f)$ و الخط $V_L = 80 I_f$ إذا القيمة هي $E_{a\max} = 111V$.

٢ - الجهد المتولد يساوي جهد أطراف المولد الاسمي ، $V_L \cong E_a = 100V$ ، نرسم خط مقاومة المجال $V_L = R_f I_f$ ي و الذي يقطع منحنى التمغنط عند الجهد 100 V ، في هذه الحالة يكون تيار المجال $I_f = 1A$ ، $R_f = R_{fc} + R_{fw} = \dfrac{V_L}{I_f} = \dfrac{100}{1} = 100\Omega$ ، $R_{fc} = 100 - 80 = 20\Omega$ وهي مقاومة التحكم في المجال اللازمة لتوليد جهد يساوي جهد الأطراف الاسمي .

٣ - نرسم خط مقاومة دائرة المجال الحرجة $V_L = R_{f(crit)} I_f$ و الذي يمر على القطعة المستقيمة لمنحنى التمغنط ، ثم نأخذ أي نقطة على هذا الخط ، $I_f = 0.5A$ و $E_a = 85V$ مثلا .

$R_{f(crit)} = \dfrac{V_L}{I_f} = \dfrac{85}{0.5} = 170\Omega$ ، تكون مقاومة التحكم في المجال في هذه الحالة $R_{fc} = 170 - 80 = 90\Omega$.

المسالة الثالثة :

مولد تيار مستمر توازي ملفوف لفا إنطباقيا ، مقاومة ملفات المنتج $0.1\ \Omega$ و مقاومة ملفات المجال $100\ \Omega$ يغذي 200 لمبة ، قدرة كل المبة $60\ W$ عندما يكون الجهد على أطرافه $100\ V$. التدفق المغناطيسي لكل قطب يساوي $0.02\ Wb$ و المنتج يحتوي على 500 موصل ، احسب :

١ - تيار المجال

٢ - تيار الحمل

٣ - تيار المنتج

٤ - الق. د.ك المتولدة

٥ التدفق المغناطيسي لكل قطب

الحل :

١ - تيار المجال

$$I_f = \frac{V_L}{R_{fw}} = \frac{100}{100} = 1A$$

٢ - التيار الذي تسحبه لمبة واحدة من المولد

$$I_{L1} = \frac{P_{L1}}{V_L} = \frac{60}{100} = 0.6A$$

تيار الحمل الذي تسحبه 200 لمبة موصلة عاى التوازي على أطراف المولد

$$I_L = 200 \times 0.6 = 120A$$

٣ - تيار المنتج

$$I_a = I_f + I_L = 1 + 120 = 121A$$

٤ - الق. د.ك تعطى بالعلاقة $E_a = V_L + I_a R_a$

$E_a = 100 + 121 \times 0.1$ أو $E_a = 112.1V$

٥ - سرعة دوران المولد $n = \frac{w_m \times 60}{2\pi}$ ، $w_m = \frac{E_a}{k_a \Phi}$ و $k_a = \frac{PZ}{2\pi A}$ ، $A = P$ لأن لف ملفات المنتج تموجي

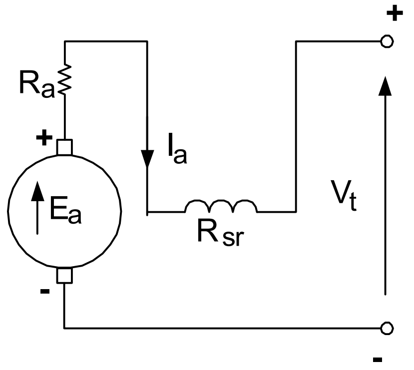
ثابت الآلة $k_a = \frac{Z}{2\pi} = \frac{500}{2\pi} = 79.58$ ، السرعة الزاوية $w_m = \frac{112.1}{79.58 \times 0.02} = 70.43 rd/\sec$

لذا تكون سرعة دوران المولد لفة/دقيقة $n = \frac{70.43 \times 60}{2\pi} = 672.5$

٢،٢ - مولد التوالي :

في هذا النوع تكون ملفات المجال موصلة بالتوالي مع ملفات المنتج أي يمر فيها تيار المنتج كله . ما دام التيار الذي يمر في ملفات المنتج أكبر بكثير من ذلك في ملفات مجال مولد التوازي فإن ملفات التوالي لا تحتوي إلا على بعض اللفات من موصل مساحة مقطعه أكبر من مساحة مقطع ملف مجال التوازي . القوة الدافعة المغناطيسية تعطى بالعلاقة $F = NI$ ، لذا نفس الق.د.ك التي ينتجها عدد قليل من اللفات بتيار عال ، يمكن أن تولدها لفات كثيرة بتيار قليل . مادام تيار الحمل الكامل يمر في ملفات مجال التوالي يجب أن يصمم هذا الأخير بأقل مقاومة ممكنة .

يبين الشكل (٥٦،١) الدائرة المكافئة لمولد تيار مستمر توالي :



الشكل٥٦،١ : مولد توالي

ملفات التوالي تولد التدفق المغناطيسي للآلة إلا عندما يمر فيها تيار المنتج ، يمكن الملاحظة أن في هذا النوع ، تيار المنتج I_a ، تيار المجال I_f ، و تيار الحمل I_L كلهم لهم نفس القيمة $(I_a = I_f = I_L)$ ، كما لا تغلق دائرة المجال (حتى يمرفيها بالطبع التيار الكهربائي) إلا إذا تم توصيل حمل على أطراف المولد .

١،٢،٢ - المعادلات التي تتحكم في تشغيل مولد التوالي عند الاستقرار :

$$E_a = k_a \cdot \Phi_{ser} \cdot w_m$$

بدون رد فعل المنتج $V_L = E_a - I_a(R_a + R_s)$ (٤١،١)

عند رد فعل المنتج $V_L = E_a - \Delta V_{A.R} - I_a(R_a + R_s)$ ، $\Delta V_{A.R}$ هو الجهد المكافئ لرد فعل المنتج

$$I_a = I_f = I_L \quad (٤٢،١)$$

$$I_{f(eff.)} = I_{f(act.)} - I_{f(A.R)}$$

$$P_{out} = V_L I_L = I_L R_L$$

$$\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{copper} + P_{mech.}$$

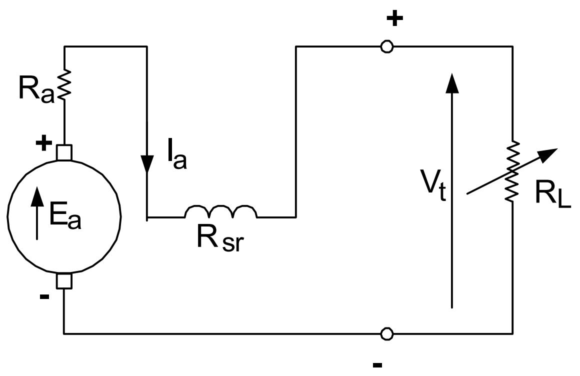
$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$$

٢,٢,٢ - خاصية اللاحمل (أو منحنى التمغنط) $E_a = f(I_f)$ عند سرعة ثابتة:

منحنى التمغنط لمولد التوالي مماثل لمنحنى التمغنط لأي مولد آخر . عند اللاحمل ، لا يمر تيار في ملفات المجال و بالتالي ينحصر جهد الأطراف V_L في قيمة صغيرة $E_{a(res.)}$ و تكون ناتجة إلا عن التدفق المغناطيسي المتبقي Φ_{res} . عند زيادة الحمل ، يزيد تيار المجال و تبعا لذلك ترتفع E_a بسرعة . الهبوط الداخلي في الجهد $I_a(R_a + R_s)$ يرتفع أيضا ، لكن في البداية زيادة الجهد المتولد E_a تتغلب عليه ، لهذا يرتع جهد الأطراف V_L . لحظة من بعد ، تقترب الآلة من التشبع و E_a تصبح تقريبا ثابتة ، عند هذا الحال يكون الهبوط الداخلي في الجهد هو المتغلب عليها و V_L تبدأ في النزول . الشكل (٥٨,١)

يمكن أيضا الحصول على منحنى التمغنط لمولد التوالي بتغذية ملف المجال من مصدر جهد مستمر خارج عن الآلة (استثارة منفصلة) .

٣,٢,٢- الخاصية الخارجية $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة :



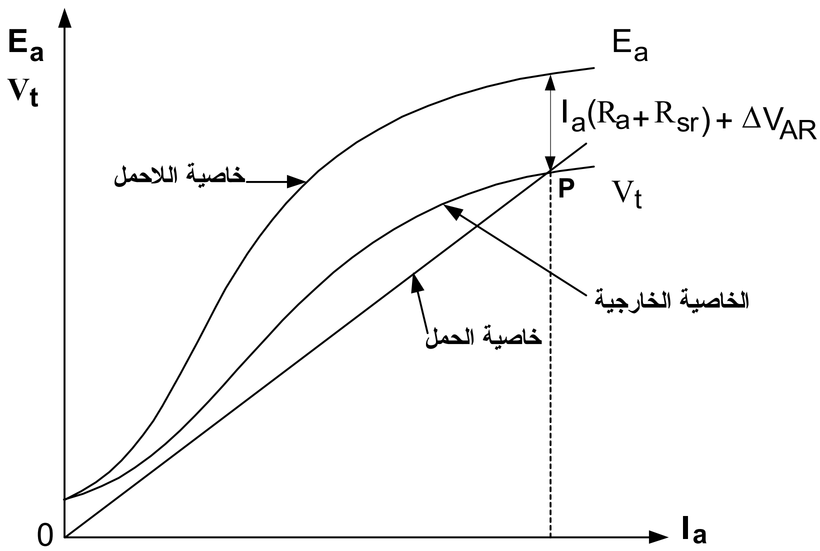
الشكل٥٧,١: مولد توالي

للحصول على الخاصية الخارجية نرسم خطا مستقيما ميله $(R_a + R_s)$ يمثل الهبوط الداخلي في الجهد $I_a(R_a + R_s)$ كما هو مبين في الشكل . المسافة العمودية ما بين منحنى التمغنط و الخط المستقيم هو الجهد على الأطراف $V_L = E_a - I_a(R_a + R_s)$ ، لقيمة معينة لتيار المنتج I_a ، هذا بدون رد فعل المنتج . في حالة ما أخذنا بعين الاعتبار رد فعل المنتج فإن الجهد على الأطراف يكون أقل من هذا.

يمكن الحصول على جهود الأطراف لعدة تيارات المنتج من الشكل (٥٨,١).

إذا كان الحمل عبارة عن مقاومة قيمتها R_L ، تكون خاصية الحمل $V_L = I_L R_L$ خط مستقيم ميله R_L . نقطة التشغيل P (الشكل ٥٨،١) لهذا الحمل تكون نقطة تقاطع منحنى خاصية الحمل مع منحنى الخاصية الخارجية. يمكن الملاحظة أنه إذا كانت المقاومة R_L كبيرة ، الجهد على الأطراف يكون قليلا جدا أي أن مولد التوالي لا يولد أي جهد معتبر .

أخيرا من الواضح جدا أن هذه الآلة ستكون مصدر جهد ثابت سيء ، و بالفعل فإن تنظيم جهده يكون عددا كبيرا سالبا .



الشكل ٥٨،١ : الخاصية الخارجية لمولد التوالي

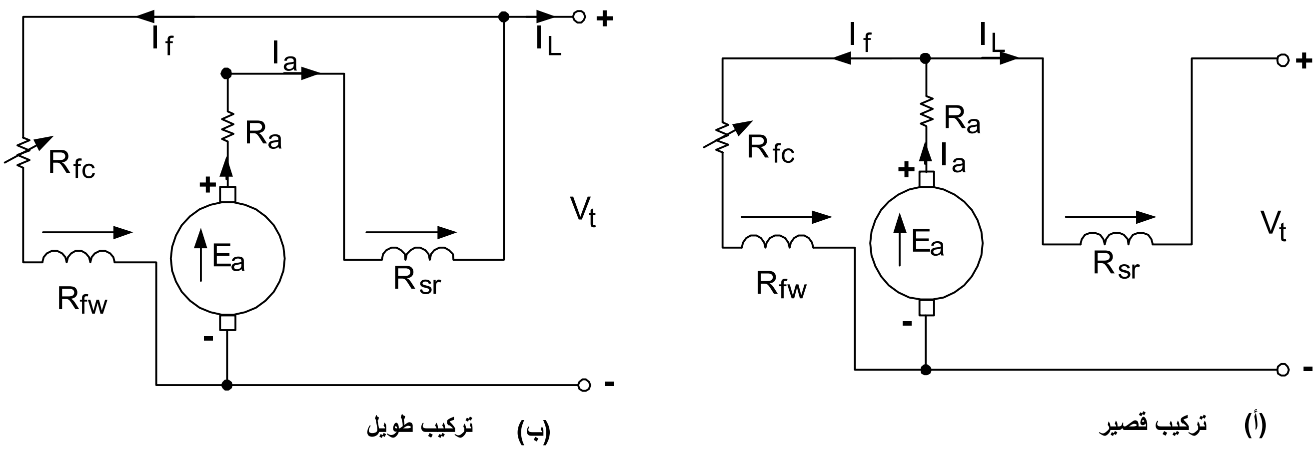
٤،٢،٢ - استخدام مولد التوالي :

يستخدم مولد التوالي في بعض التطبيقات الخاصة التي تستعمل فيها خاصية زيادة الجهد المتولد بزيادة تيار الحمل ، واحدة من هذه التطبيقات العملية هي اللحام الكهربائي . مولد التيار المستمر التوالي الذي يستخدم في اللحام له رد فعل المنتج عالي الذي يعطيه خاصية خارجية كالتي مبينة في الشكل (٥٨،١) للملاحظة عندما تلتمس قضبان اللحام مع بعضها قبل ما يبدأ اللحام ، يمر تيار عالٍ و عندما تفصل عن بعضها يزيد الجهد بسرعة بينما يبقى التيار عاليا ، هذا الجهد يحافظ على القوس الكهربائي بين القضيبين (خلال الهواء) عند اللحام .

٣،٢ - مولدات التيار المستمر المركبة :

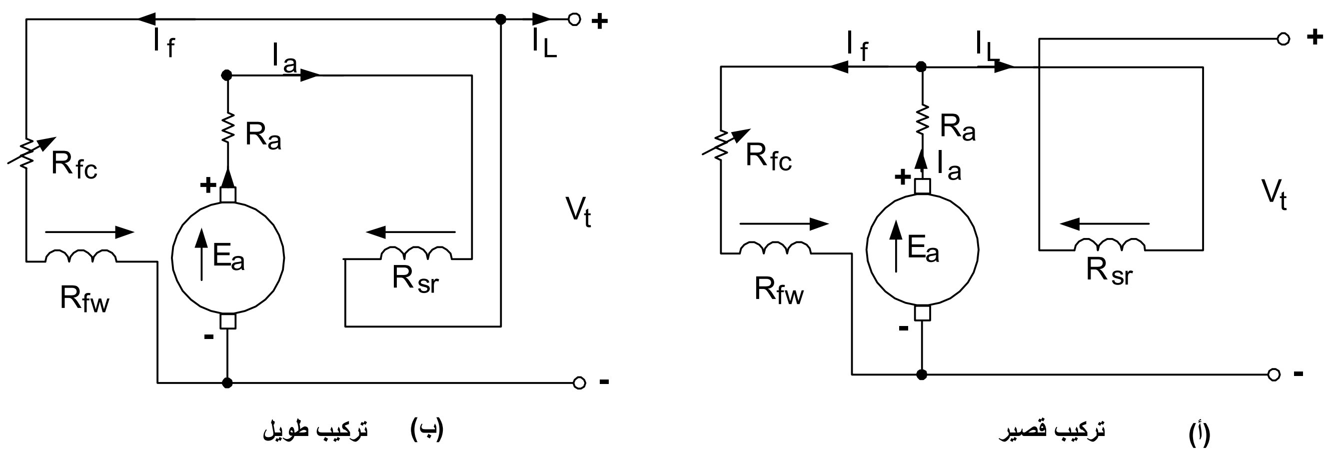
كثير من التطبيقات العملية تتطلب أن جهد الأطراف يبقى ثابتا عند تغير الحمل ، لكن عندما تعطي مولدات التيار المستمر تيارا ينخفض جهد الأطراف بسبب الهبوط الداخلي للجهد $(I_a R_a)$ و إضعاف مجال الأقطاب نتيجة رد فعل المنتج .

للقضاء على تأثيرات هبوط الجهد الداخلي و إضعاف مجال الأقطاب نتيجة رد فعل المنتج ، يمكن تركيب ملف على أقطاب المجال فوق ملف المجال التوازي الأصلي و تسمى الآلة في هذه الحالة آلة مركبة.
هذا الملف الإضافي و الذي يعرف بملف التوالي ، يوصل إما حسب التركيب القصير
(الشكل ٥٩,١ أ و ٦٠,١ أ) و إما حسب التركيب الطويل (الشكل٥٩,١ ب و ٦٠,١ ب) كما سبق تعريفه . عند مرور تيار في ملف التوالي الإضافي يولد تدفقا مغناطيسيا Φ_{ser} إما يساعد التدفق المغناطيسي Φ_{sh} لملف التوازي و تكون الآلة من النوع التراكمي (cumulative compound machine)



الشكل ٥٩,١ : مولد مركب تراكمي

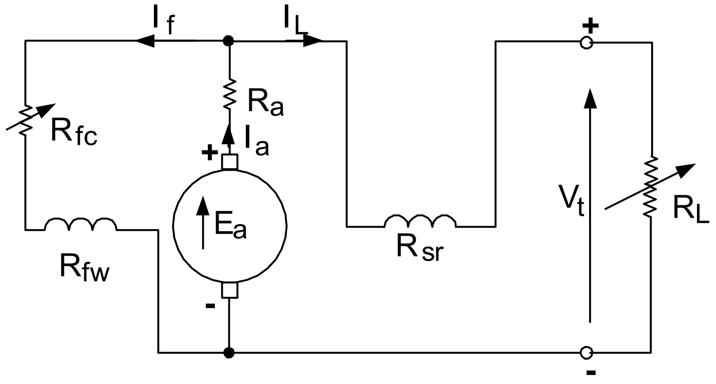
و إما يعاكسه و تكون الآلة من النوع التفاضلي أو الفرقي (differential compound machine)



الشكل ٦٠,١ : مولد مركب تفاضلي

في الآلة المركبة يكون ملف مجال التوازي هو ملف المجال الرئيسي الذي يولد أكبر مقدار لمجال الآلة . يتكون ملف التوازي من عدة لفات بمساحة مقطع أصغر و يمر فيه تيار أقل مقارنة مع المنتج ، بينما لملف التوالي عدد لفات أقل و مساحة مقطع أكبر و يحمل تيار المنتج . يستعمل ملف التوالي أساسا لتعويض الهبوط الداخلي للجهد $(I_a R_a)$ و رد فعل المنتج الممثل في هبوط الجهد $(\Delta V_{A.R})$.

١,٣,٢ - التركيب القصير (short shunt connection)



الشكل ٦١,١: مولد مركب قصير عند التحميل

الشكل (٦١,١) يبين الدائرة المكافئة لمولد التيار المستمر من النوع التركيب القصير ، و فيه يوصل ملف التوازي مباشرة على المنتج .

المعادلات التي تتحكم في أداء مولد التركيب القصير في الحالة المنتظمة و المستقرة هي :

$$V_L = E_a - I_a R_a - I_L R_{sr} \quad (٤٣,١)$$

$$R_f = R_{fc} + R_{fw} \text{ ، } \quad I_f = \frac{E_a - I_a R_a}{R_f} \quad (٤٥,١)$$

$$I_a = I_L + I_f \quad (٤٤,١)$$

$$P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a + I_L^2 R_{sr} \quad (٤٦,١)$$

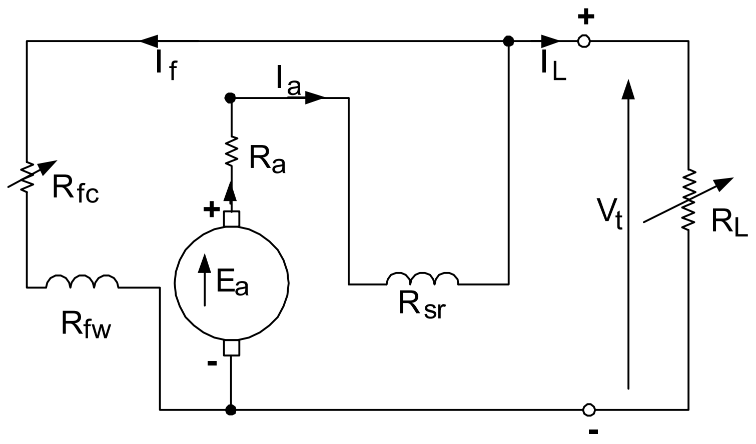
٢,٣,٢ - التركيب الطويل (long shunt connection)

الدائرة المكافئة لمولد التيار المستمر من النوع التركيب الطويل مبينة في الشكل (٦٢,١)، وفيه يوصل ملف التوازي على الدائرة المكونة من ملف التوالي الموصل على التوالي مع المنتج .

المعادلات التي تتحكم في الأداء المنتظم و المستقر لمولد التيار المستمر من النوع التركيب الطويل هي كالآتي

$$V_L = E_a - I_a (R_a + R_{sr}) \qquad I_f = \frac{V_L}{R_f}$$

$$I_a = I_f + I_L \qquad P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 (R_a + R_{sr})$$



الشكل ٦٢,١: مولد مركب طويل عند التحميل

٣,٣,٢ - تيار المجال الفعلي في التركيبين القصير و الطويل

يمكن كتابة المعادلة التالية للقوة الدافعة الكهربائية لكل من التوصيلين إذا ما افترضنا علاقة خطية للتدفق المغناطيسي مع تيار المجال :

$E_a = k_a (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr})$ ، Φ_{sh} التدفق المغناطيسي لكل قطب و الناتج عن ملف التوازي

Φ_{sr} التدفق المغناطيسي لكل قطب و الناتج عن ملف التوالي

تكون إشارة + عندما يساعد مجال التوالي مجال التوازي في الآلة المركبة من النوع التراكمي

- عندما يعاكس مجال التوالي مجال التوازي في الآلة المركبة من النوع التفاضلي .

تجدر الملاحظة أن القوة الدافعة المغناطيسية لملف التوازي F_{sh} و القوة الدافعة المغناطيسية لملف التوالي F_{sr} تعملان على نفس الدائرة المغناطيسية ، لذا تكون القوة الدافعة المغناطيسية الكلية و الفعلية لكل قطب :

$$F_{eff} = F_{sh} \pm F_{sr} - F_{A.R} \quad ، \quad N_f I_{f(eff)} = N_f I_f \pm N_{sr} I_{sr} - N_f I_{f(A.R)}$$

N_f عدد لفات ملف التوازي و لكل قطب

N_{sr} عدد لفات ملف التوالي و لكل قطب

$F_{A.R}$ القوة الدافعة المغناطيسية المكافئة لرد فعل المنتج

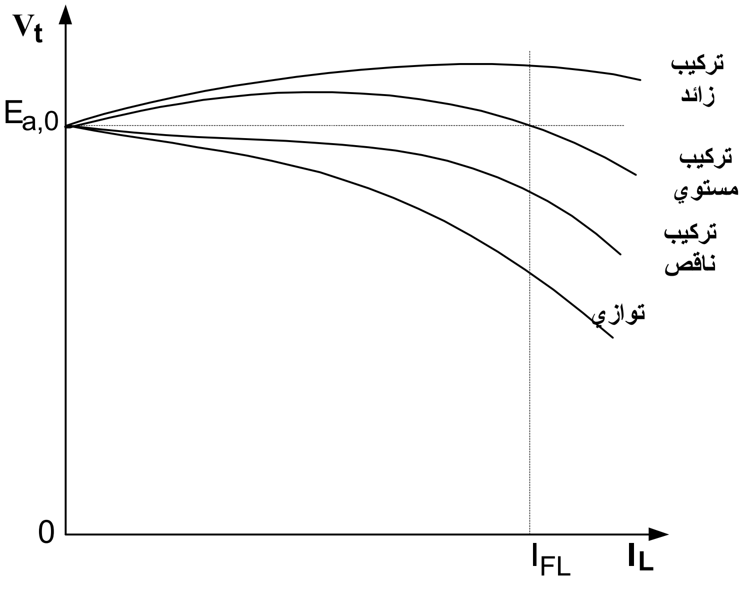
I_{sr} التيار الذي يمر في ملف التوالي و يساوي I_L في التركيب القصير و I_a في التركيب الطويل

يمكن إذا كتابة معادلة تيار المجال الفعلي للآلة على النحو التالي :

$I_{f(eff)} = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - I_{f(A.R)}$ ، $I_{f(A.R)}$ تيار المجال المكافىء لرد فعل المنتج .

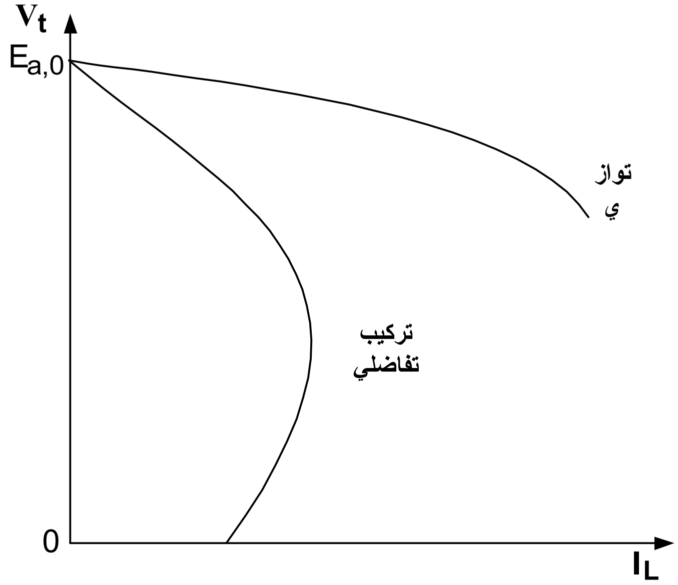
٤,٣,٢ - منحنيات الخواص الخارجية للمولدات المركبة $V_L = f(I_L)$ عند سرعة ثابتة:

منحنيات الخواص الخارجية للمولدات المركبة مبينة في الشكل (٦٣,١) . في النوع التراكمي عند زيادة تيار المنتج ، جهد أطراف المولدات المركبة إما يرتفع عن جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيباً زائداً (overcompound) أو ينخفض عن جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيباً ناقصاً (undercompound) أو يساوي جهد الحمل الكامل و تسمى الحالة تركيباً مستوياً (flat compounding) . هذا متعلق كله بدرجة التركيب أي بعدد لفات ملف التوالي .



الشكل ٦٣,١: الخاصية الخارجية للمولد المركب التراكمي

في النوع التفاضلي و بسبب معاكسة مجال التوالي لمجال التوازي يهبط جهد الأطراف بسرعة عند زيادة تيار المنتج الشكل (٦٤,١) بينما يبقى أساسا التيار المكافىء لرد فعل المنتج ثابتا . خاصية التيار المحدود للمولدات التفاضلية تجعلها مناسبة للحام الكهربائي .



الشكل ٦٤،١: الخاصية الخارجية للمولد المركب التفاضلي

٥،٣،٢ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى :

عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر من نوع التركيب الطويل ملفوف لفا انطباقيا له 476 موصل و يعطي تيار 101.3 A عندما يدور بسرعة 1800 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار تدفقه 0.015 Wb ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.1 Ω ، مقاومة ملفات التوازي 150 Ω و مقاومة ملفات التوالي 0.04 Ω . إذا كانت المفاقيد الحديدية و الميكانيكية تساوي 1827 W و مع إهمال رد فعل المنتج احسب عند هذا الحمل :

١ - الق.د.ك المتولدة في المنتج
٢ - الجهد على الأطراف الخارجية للمولد
٣ - تيار مجال ملف التوازي
٤ - تيار الحمل
٥ - قدرة الخرج التي يعطيها المولد لهذا الحمل
٦ - المفاقيد الكلية
٧ - كفاءة هذا المولد

الحل :

١ - القوة الدافعة الكهربائية (ق.د.ك) تعطى بالعلاقة $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ ، $w_m = 2\pi \times \frac{n}{60}$ ، $k_a = \frac{PZ}{2\pi A} = \frac{Z}{2\pi}$ لأن $A = P$ اللف انطباقي

ثابت الآلة $k_a = \frac{476}{2\pi} = 75.75$ ، السرعة الزاوية $w_m = 2\pi \times \frac{1800}{60} = 188.5 rd/\sec$

$E_a = 75.75 \times 0.015 \times 188.5$ أو $E_a = 214.2V$

٢ - جهد خرج المولد $V_L = E_a - I_a(R_a + R_{sr})$ ، $V_L = 214.2 - 101.3 \times (0.1 + 0.04)$ أو $V_L = 200V$

٣ - تيار مجال ملف التوازي $I_f = \frac{V_L}{R_{fw}}$ ، $I_f = \frac{200}{150} = 1.3A$

٤ - تيار الحمل $I_L = I_a - I_f$ ، $I_L = 101.3 - 1.3 = 100A$

٥ - قدرة خرج المولد $P_{out} = V_L \times I_L$ ، $P_{out} = 200 \times 100 = 20000W = 20Kw$

٦ - مفاقيد المولد الكلية $\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}$

المفاقيد الحديدية و الميكانيكية $P_{iron} + P_{mech} = 1827W$

المفاقيد النحاسية $P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 \times (R_a + R_{sr})$ ، $P_{cu} = (1.3)^2 \times 150 + (101.3)^2 \times (0.1 + 0.04)$

$P_{cu} = 1703W$.

المفاقيد الكلية تساوي إذا $\sum P_{losses} = 1827 + 1703 = 3530W$

٧ - كفاءة المولد $\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$ ، $\eta\% = \frac{20000}{20000 + 3530} \times 100 = 85\%$

المسألة الثانية :

مولد تيار مستمر مركب قصير له 320 موصل و ملفوف لفا انطباقيا ، يعطي منتجه تيار 50 A عندما يدور بسرعة 900 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار تدفقه 0.025 Wb ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.1 Ω ، مقاومة ملفات التوازي 57 Ω ، مقاومة ملفات التوالي 0.1 Ω .

إذا كانت المفاقيد الحديدية و الميكانيكية تساوي 375 W و إهمال رد فعل المنتج ، احسب :

١ - الق.د.ك المتولدة في المنتج
٢ - تيار مجال ملف التوازي
٣ - تيار الحمل
٤ - جهد خرج المولد (الجهد المسلط على الحمل)
٥ - قدرة خرج المولد (القدرة التي يعطيها المولد للحمل)

٦ - المفاقيد الكلية

٧ - كفاءة المولد

الحل :

١ - ثابت الآلة $k_a = \frac{PZ}{2\pi A} = \frac{Z}{2\pi}$ لأن $A = P$ في حالة اللف الانطباقي ، $k_a = \frac{320}{2\pi} = 50.93$

السرعة الزاوية $w_m = 2\pi \times \frac{n}{60}$ ، $w_m = 2\pi \times \frac{900}{60} = 94.25 rd/\sec$

القو.د.ك المتولدة في المنتج $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ ، $E_a = 50.93 \times 0.025 \times 94.25 = 120V$

٢ - تيار ملف التوازي $I_f = \frac{E_a - I_a R_a}{R_{fw}}$ ، $I_f = \frac{120 - 50 \times 0.1}{57} = 2A$

٣ - تيار الحمل : $I_L = I_a - I_f$ ، $I_L = 50 - 2 = 48A$

٤ - جهدخرج المولد $V_L = E_a - I_a R_a - I_L R_{sr}$ ، $V_L = 120 - 50 \times 0.1 - 48 \times 0.1 = 110.2V$

٥ - قدرة خرج المولد $P_{out} = V_L \times I_L$ ، $P_{out} = 110.2 \times 48 = 5290W$

٦ - المفاقيد الكلية $\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}$ ، $P_{iron} + P_{mech} = 375W$ المفاقيد الحديدية والميكانيكية

المفاقيد النحاسية $P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a + I_L^2 R_{sr}$ ،

$$P_{cu} = (2)^2 \times 57 + (50)^2 \times 0.1 + (48)^2 \times 0.1 = 708.4W$$

المفاقيد الكلية تساوي إذا $\sum P_{losses} = 375 + 708.4 = 1083.4W$

٧ - كفاءة المولد $\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \times 100$ ، $\eta\% = \frac{5290}{5290 + 1083.4} \times 100 = 83\%$

المسألة الثالثة :

لمولد تيار مستمر مركب قصير من النوع التراكمي (20 Kw ، 200 V ، 1800 لفة/دقيقة) مقاومات ملفات المنتج ، ملف مجال التوازي و ملف مجال التوالي 0.1 Ω ، 150 Ω ، 0.04 Ω على الترتيب . لملف مجال التوازي 1200 لفة لكل قطب . نتائج خاصية التمغنط لهذا المولد عند السرعة 1800 لفة /دقيقة تعطى في الجدول التالي :

$I_f(A)$	0.00	0.375	0.50	0.75	0.875	1.00	1.125	1.25	1.50	1.75
$E_a(V)$	5	33.5	67	134	160	175	190	200	214	223

احسب عدد لفات ملف مجال التوالي لكل قطب N_{sr} اللازمة لجعل جهد أطراف المولد يساوي 200 V عند اللاحمل و عند الحمل الكامل . مع العلم أن قيمة مقاومة التحكم في مجال التوازي $R_{fc} = 10\Omega$ و رد فعل المنتج مكافىء لتيار مجال $I_{f(A.R)} = 0.15A$

الحل :

تيار الحمل الكامل $I_{a(F.L)} = \dfrac{P_{a(rated)}}{I_{L(rated)}}$ ، $I_{a(F.L)} = \dfrac{20000}{200} = 100A$

تيار المنتج $I_a = I_f + I_L$ ، $100 = I_f + I_L$ ....(1)

تيار مجال ملف التوازي $I_f = \dfrac{V_L + R_{sr} I_L}{R_{fc} + R_{fw}}$ ، $I_f = \dfrac{200 + 0.04 I_L}{10 + 150}$ ....(2)

تعويض المعادلة (2) في المعادلة (1) يعطي $100 = \dfrac{200 + 0.04 I_L}{160} + I_L$ ، $16000 = 200 + 0.04 I_L + 160 I_L$

لذا يكون تيار الحمل $I_L = 98.7A$ و بتعويض هذه القيمة في المعادلة (1) نتحصل على تيار مجال ملف التوازي

$I_f = 100 - 98.7 = 1.3A$.

الجهد الفعلي المتولد في ملفات عضو الاستنتاج $E_{a(eff)} = V_L + I_a R_a + I_L R_{sr}$ ....(3)

$E_{a(eff)} = 200 + 100 \times 0.1 + 98.7 \times 0.04 \cong 214V$

من الجدول تيار المجال الفعلي المناظر للجهد $E_{a(eff)} \cong 214V$ هو $I_{f(eff)} = 1.5A$

معادلة تيارات المجال للمولد من مركب قصير تراكمي : $I_{f(eff)} = I_{f(act)} + \dfrac{N_{sr}}{N_f} I_L - I_{f(A.R)}$ ....(4)

في هذا النوع تيار مجال ملف التوالي هو تيار الحمل $I_{sr} = I_L$ و إشارة + تدل على نوع التراكمي

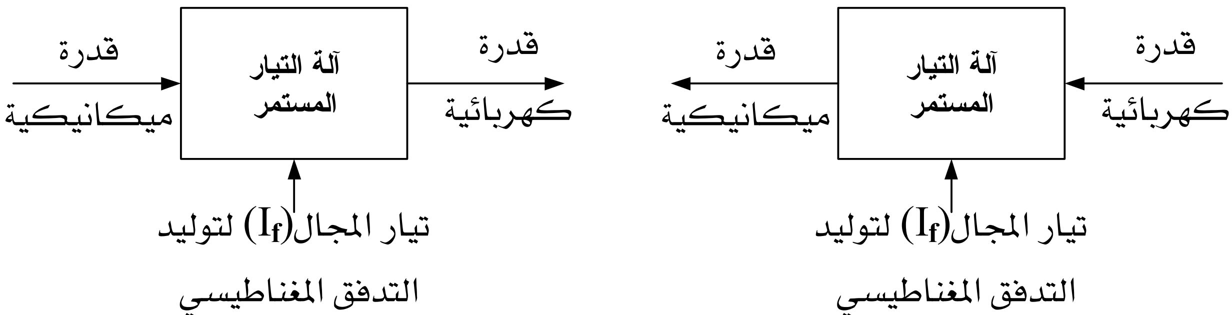
كل مقادير التيارات معلومة ما عدا عدد لفات ملف التوالي N_{sr} : $1.5 = 1.3 + \dfrac{N_{sr}}{1200} \times 98.7 - 0.15$

مما يعطي $N_{sr} = 4.25$ لفة لكل قطب

٤،١ محركات التيار المستمر

١ - مقدمة :

من ميزات آلات التيار المستمر أنها قابلة للعمل كمولد أو كمحرك و هذا مبين في الشكل الموالي المسألة كلها متعلقة باتجاه تدفق القدرة خلال الآلة. في حالة المولد يكون الدخل للآلة هي القدرة الميكانيكية التي تعطيها لها الآلة الميكانيكية المحركة (تربينة ، محرك ديزل ، محرك كهربائي) فينتج قدرة كهربائية ، تظهر على خرجه و تسحب من أطراف عضو استنتاجه عند الحمل . بينما في حالة المحرك يكون الدخل القدرة الكهربائية التي يسحبها عضو استنتاجه إذا ما تم توصيل أطرافه إلى الشبكة الكهربائية فينتج عزما و قدرة ميكانيكية تظهر على خرجه و تسحب من عمود الدوران عند الحمل .



الشكل ٦٥،١ : تحويل القدرة الكهروميكانيكية

تستخدم الآن آلات التيار المستمر أكثر كمحركات و هذا لعدة أسباب منها :

١ - الشبكات الكهربائية بالتيار المستمر لا زالت مستعملة في السيارات و كذلك الرافعات و الجرافات، الطائرات ، البواخر ، فيكون من المعقول إذا استخدام محركات التيار المستمر .

٢ - الحالات التطبيقية والتي تتطلب مجالا عريضا للتغيير الدقيق للسرعة ، خاصة وأن الآن إلكترونيات القدرة تسمح بتغذية المحركات بالقدرة الكهربائية اللازمة (تيار مستمر) فنتحصل على التحكم في السرعة المرغوب فيها و لو أن حتى هذا المجال أصبح الآن يستعمل المحركات الحثية الثلاثية الوجه إلا أنه هناك بعض التطبيقات في الواقع العملي التي لا زالت فيها محركات التيار المستمر هي المفضلة .

تغذى محركات التيار المستمر من مصدر تيار مستمر ، لذا نفترض أن جهد تغذية محرك التيار المستمر ثابت إلا في حالة ما تم تحديد غير ذلك . هذا الافتراض سيسهل تحليل المحركات و المقارنة ما بين أنواعها.

هناك خمسة أنواع أساسية لمحركات التيار المستمر المستعملة :

١ - محرك التيار المستمر ذو الاستثارة المنفصلة
٢ - محرك التيار المستمر ذو الاستثارة توازي
٣ - محرك التيار المستمر ذو الاستثارة توالي
٤ - محرك التيار المستمر ذو الاستثارة المركبة
٥ - محرك التيار المستمر ذو المغناطيسية الدائمة

في كلا حالي تشغيل آلة التيار المستمر (مولد أو محرك) فإن ملفات المنتج تدور في مجال مغناطيسي و تحمل تياراً كهربائياً . و تبعا لذلك فإن المعادلتين الأساسيتين : $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ و $T_e = k_a \cdot \Phi \cdot I_a$ تستعملان للمولد و المحرك .

و يلاحظ أن اتجاه كلا من تيار الاستثارة و سرعة الدوران لا يتأثر بتغير دور الآلة من مولد إلى محرك والعكس صحيح و يمكن مراجعة ذلك بتطبيق قاعدتي فلمنج لليد اليمنى للمولد و اليد اليسرى للمحرك في نفس الوقت ، و لذلك نجد أن لكي تبقى السرعة و كذلك تيار الاستثارة ثابتين يجب أن ينعكس اتجاه مرور التيار في ملفات المنتج بالنسبة للحالتين كما هو في الواقع فإن التيار يكون خارجا من المولد و داخلا في المحرك و يجب مراعاة ذلك عند كتابة معادلات قانون كرشوف للجهود :

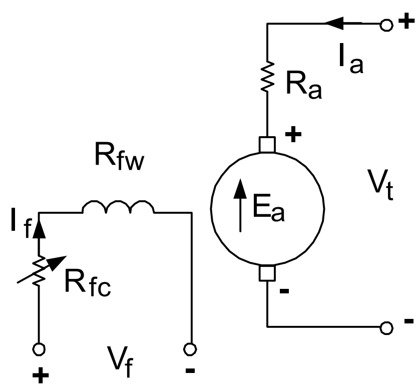
- في حالة المولد : $V_t = E_a - R I_a$ أو $E_a = V_t + R I_a$
- في حالة المحرك : $V_t = E_a + R I_a$ أو $E_a = V_t - R I_a$

❖ $R = R_a$ عند الاستثارة المنفصلة أو التوازي ، R_a مقاومة ملفات المنتج

❖ $R = (R_a + R_s)$ عند الاستثارة توالي أو التركيب الطويل، R_s مقاومة ملفات مجال التوالي .

٢ - محركات التيار المستمر ذات الاستثارة توازي و الاستثارة منفصلة :

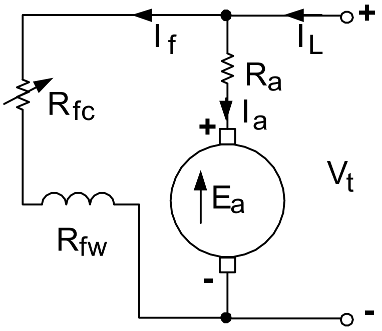
محرك التيار المستمر ذو الاستثارة المنفصلة هو محرك تغذى دائرة مجاله من مصدر جهد مستمر ثابت



الشكل ٦٦،١ : محرك الاستثارة المنفصلة

بينما في المحرك التوازي توصل ملفات المجال إلى طرفي عضو الاستنتاج ، عندما يكون جهد تغذية محرك التوازي ثابتا لا يوجد هنالك أي اختلاف عملي في أداء المحركين، فتغذية ملفات المجال مستقلة عن المنبع. إن لم يتم تخصيص غير ذلك ، كل وصف لأداء محرك التوازي يعني كذلك محرك الاستثارة المنفصلة . لذا نكتفي بتحليل محرك التوازي فقط .

الدائرة المكافئة لمحرك التوازي مبينة في الشكل الموالي :



الشكل ٦٧,١ : محرك الاستثارة توازي

و فيها توصل ملفات المنتج و المجال على التوازي على طرفي مصدر جهد مستمر ذي قيمة V_t .

١,٢- المعادلات التي تتحكم في تشغيل محرك التوالي في حالة الاستقرار هي كالآتي :

(٤٨,١) $E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m$ القوة الدافعة الكهربائية المتولدة المضادة ،

$w_m = 2\pi \frac{n}{60} rd/\sec$ السرعة الزاوية

(٤٩,١) $V_t = E_a - \Delta V_{A.R} + I_a R_a$ جهد الدخل أو جهد المصدر المسلط على المحرك

$\Delta V_{A.R}$ جهد رد فعل المنتج.

(٥٠,١) $V_t = (R_{fc} + R_{fw}) I_f = R_f I_f$

(٥١,١) $I_f = \frac{V_t}{R_f}$ تيار المجال

(٥٢,١) $I_L = I_a + I_f$ تيار الذي يسحبه المحرك من المصدر ،

I_a التيار الذي يمر في ملفات المنتج

$\sum P_{losses} = P_{iron} + P_{mech} + P_{cu}$ المفاقيد الكلية

$P_{cu} = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a$ المفاقيد النحاسية

(٥٣،١) $P_1 = V_t I_L$ القدرة التي يسحبها المحرك من الشبكة (قدرة دخل المحرك)

(٥٤،١) $P_m = E_a I_a$ القدرة الميكانيكية المتولدة

(٥٥،١) $T_m = \frac{P_m}{w_m}$ العزم المتولد وهو العزم الكلي

$P_2 = P_1 - \sum P_{losses}$ القدرة الميكانيكية المفيدة و المتوفرة على الخرج (على عمود الإدارة)

(٥٦،١) $T_2 = \frac{P_2}{w_m}$ العزم على عمود الإدارة

(٥٧،١) $\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{losses}} \times 100 = \left(1 - \frac{\sum P_{losses}}{P_1}\right) \times 100$ كفاءة المحرك

ملاحظة مهمة : تيار المنتج I_a و سرعة المحرك w_m متعلقان بالحمل الميكانيكي الموصل لعمود الدوران.

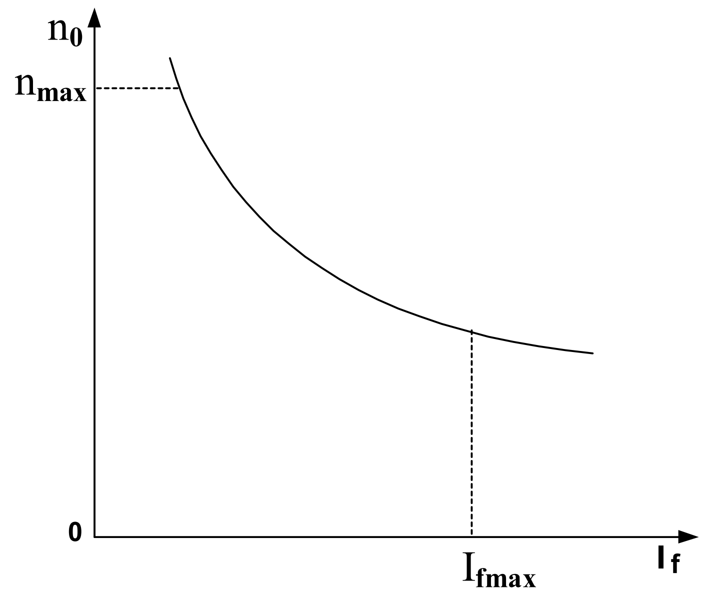
٢،٢- خواص محركات التوازي (أو محركات الاستثارة المنفصلة)

الخواص هي المنحنيات التي تعبر بيانيا عن العلاقات بين المتغيرات التالية : التيار الذي يسحبه المحرك من المصدر ، سرعة و عزم المحرك . تختلف هذه الخواص بتغير نوع الاستثارة .

- في حالة محرك الاستثارة المنفصلة ، يجب تغذية دائرة المجال قبل تغذية دائرة المنتج .
- في حالة محرك التوازي ، تغذية دائرة المنتج يجب أن تكون تدريجيا .

عند الظروف العادية للاستخدام ، هذه المحركات تمتلك خواص المحرك ذي التدفق المغناطيسي الثابت .

١،٢،٢ - خاصية السرعة عند اللاحمل : $n_0 = f(I_f)$ ، $T_2 = 0$ و V_t ثابتة



الشكل ٦٨،١ : تغير سرعة المحرك التوازي مع تيار الاستثارة

عند اللاحمل يسحب المحرك قدرة $V_t(I_{a,0}+I_f)$ مناظرة لمفقوداته و يسحب المنتج تيار $I_{a,0}$ تكون قيمته ضعيفة و يمكن إهمال تأثيره ، لذا نتحصل على المعادلة التالية :

$V_t = E_{a,0}+I_{a,0}R_a \cong E_{a,0}$ و تعويض علاقة $E_{a,0}=k_a\Phi_0 w_{m,0}$ يعطي $V_t \cong k_a\Phi_0 w_{m,0}$ و بالتالي السرعة $w_{m,0} \cong \dfrac{V_t}{k_a\Phi_0}$ (rd/sec) أو

$$n_0 \cong \frac{V_t}{k_1\Phi_0} \quad \text{(r.p.m)} \qquad (٥٨،١)$$

لفة/دقيقة (r.p.m) و هي سرعة المحرك عند اللاحمل ،

حيث الثابت $k_1 = k_a \times \dfrac{2\pi}{60} = \dfrac{ZP}{2\pi A}\times\dfrac{2\pi}{60} = \dfrac{ZP}{60A}$

التدفق المغناطيسي Φ_0 ناتج عن تيار المجال I_f و يكون ثابتا طالما جهد المصدر ثابتا (في الواقع العملي ينقص تدفق الثغرة الهوائية نتيجة تأثير رد فعل المنتج ($\Phi_0-\Phi_{A.R}$) مما يزيد في السرعة) كما يمكن تغيير I_f و بالتالي Φ_0 بإضافة مقاومة متغيرة R_{fc} التي توصل على التوالي مع ملفات المجال $\left(I_f=\dfrac{V_t}{R_{fc}+R_{fw}}\right)$. التدفق المغناطيسي متناسب مع تيار المجال على الأقل قبل مرحلة التشبع :

$\Phi_0=k_2 I_f$ و تعويضها في علاقة السرعة تعطي : لفة / دقيقة $n_0 \cong \dfrac{V_t}{k_3 I_f}$ حيث إن الثابت $k_3=k_1k_2$

إذا العلاقة $n_0 \cong \dfrac{V_t}{k_3 I_f}$ تبين أن سرعة محرك الاستثارة توازي عند اللاحمل متناسبة عكسيا مع مع تيار المجال I_f . (انظر الشكل٦٨،١)

٢،٢،٢- خاصية سرعة المحرك عند التحميل : $n=f(I_a)$ مع ثبات V_t و I_f

تعطى سرعة المحرك عند التحميل بالعلاقة $w_m=\dfrac{V_t-I_aR_a}{k_a\Phi_0}$ أو $n=\dfrac{V_t-I_aR_a}{k_1\Phi_0}$ و التي يمكن إعادة كتابتها على النحو التالي : $n=\dfrac{V_t}{k_1\Phi_0}\left(1-\dfrac{I_aR_a}{V_t}\right)$ و مادامت $n_0 \cong \dfrac{V_t}{k_1\Phi_0}$ سرعة المحرك عند اللاحمل، نتحصل على العلاقة التالية لسرعة محرك التوازي عند التحميل :

$$n = n_0\left(1-\frac{I_aR_a}{V_t}\right) \qquad (٥٩،١)$$

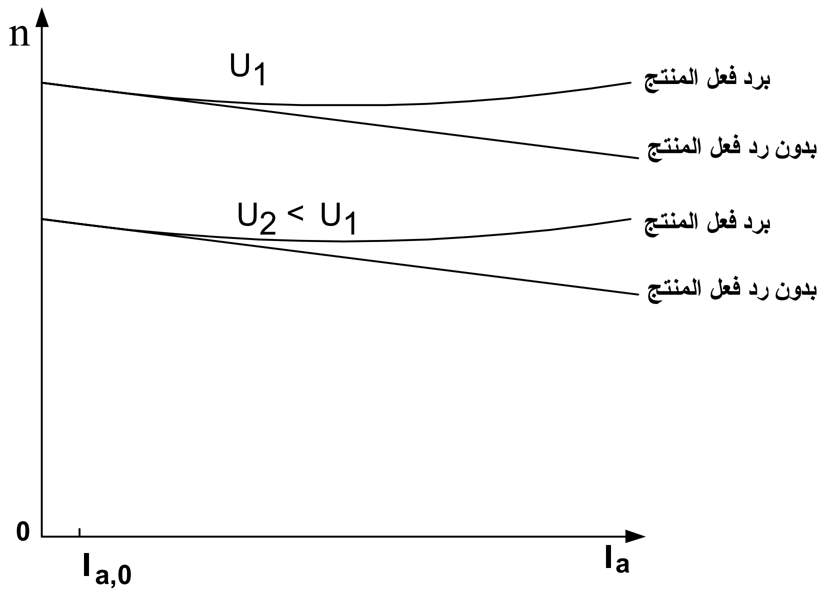
لفة / دقيقة

في حالة غياب رد فعل المنتج و بتدفق مغناطيسي ثابت ، تمثل سرعة محرك التوازي دالة خطية متناقصة مع التيار الذي يسحبه المنتج إلا أن تناقصها عن سرعة اللاحمل n_0 بسبب زيادة هبوط الجهد (I_aR_a) في مقاومة المنتج عند التحميل يبقى طفيفا لأن I_aR_a حتى لتيار الحمل الكامل يكون دائما ضعيفا كقيمة نسبية مقارنة مع V_t . (انظر الشكل ٦٩،١)

لذا يمكن القول إن سرعة محرك التوازي تبقى تقريبا ثابتة نسبيا مهما كان الحمل .

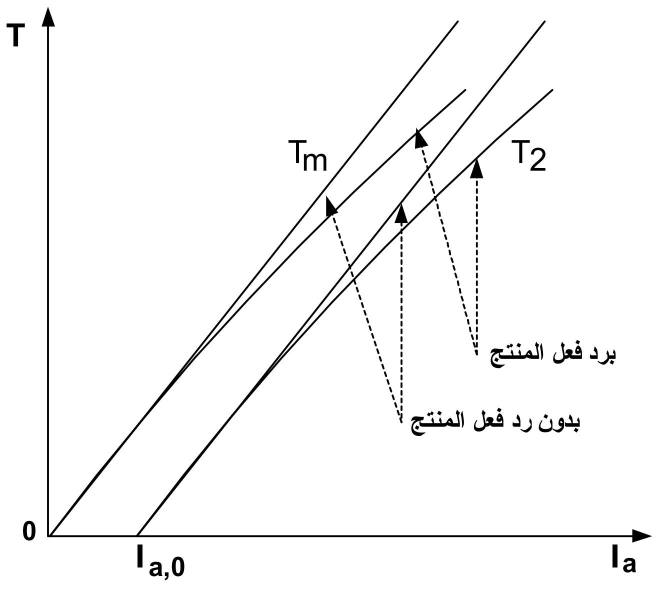
يتسارع محرك التوازي في حالة تخفيض أو قطع تيار الإستثارة.

كما سبق ذكره فإن رد فعل المنتج يضعف التدفق المغناطيسي و بالتالي يزيد في السرعة (الشكل٦٩،١)



الشكل ٦٩،١ : تغير سرعة المحرك التوازي بتير المنتج

٣،٢،٢ - خاصية العزم : $T_m = f(I_a)$، $T_2 = f(I_a)$



الشكل٧٠،١: تغير عزم المحرك التوازي مع تيار المنتج

يعطى العزم الكهرومغناطيسي (أو الميكانيكي الكلي) بالعلاقة : $T_m = k_a \cdot \Phi_0 \cdot I_a$ كما أن هذا العزم يظهر أيضا في علاقة القدرة الميكانيكية الكليةالمحولة: $P_m = T_m w_m = E_{a,L} I_a$ أو $T_m = \frac{E_{a,L} I_a}{w_m}$

في حالة تدفق مغناطيسي $\Phi_0(I_f)$ ثابت يكون العزم الكهرومغناطيسي متناسبا مع تيار المنتج :

$$T_m = k_a \Phi_0(I_f) I_a = K I_a \qquad (٦٠,١)$$

عند تيار المنتج I_a معين يتناقص العزم عندما ينخفض التدفق المغناطيسي Φ_0 لزيادة السرعة .

❖ عزم المفاقيد (الميكانيكية و الحديدية) T_f يكون تقريبا ثابتا للأسباب التالية :

(أ) المفاقيد الميكانيكية P_{mech} متعلقة بالسرعة و التي نفسها تبقى تقريبا ثابتة عند زيادة التحميل على المحرك .

(ب) المفاقيد الحديدية P_{iron} متعلقة بجهد تغذية المحرك V_t و السرعة n ، عند السرعة الاسمية و استثارة معينة تكون تقريبا هي الأخرى ثابتة . و تسمى المفاقيد $(P_f = P_{mech} + P_{iron})$ المفاقيد الثابتة .

إذا يمكن افتراض أن عزم المفاقيد T_f لا يتأثر بتيار المنتج عند التحميل ، و من هنا يمكن كتابة علاقة العزم المفيد أو النافع T_2 على عمود الدوران : $T_2 = T_m - T_f$ ، ($T_2 \langle T_m$) .

كما أن $T_f = \frac{P_f}{w_m}$ حيث المفاقيد $P_f \cong V_t I_{a,0}$ تكون تقريبا القدرة التي يسحبها المحرك من المصدر عند اللاحمل ، $I_{a,0}$ التيار الذي يمر في المنتج عند اللاحمل .

لذا يمكن إعادة كتابة T_2 على النحو التالي :

$$\begin{aligned} T_2 &= T_m - T_f \\ &= \frac{E_a I_a}{w_m} - \frac{P_{mech} + P_{iron}}{w_m} \\ &= \frac{E_a I_a - V_t I_{a,0}}{w_m} \\ &\cong \frac{E_a (I_a - I_{a,0})}{w_m} \qquad (٦١,١) \end{aligned}$$

من المعادلة السابقة نتحصل على منحنى العزم المفيد على عمود الدوران $T_2 = f(I_a)$ من منحنى العزم الكهرو مغناطيسي $T_m = f(I_a)$ بتحويلات متساوية للتيار $I_{a,0}$ ، (انظر الشكل٧٠,١) .

رد فعل المنتج يخفض التدفق المغناطيسي $(\Phi_0 - \Phi_{A.R})$ وبالتالي العزم (الشكل٧٠,١)

٤,٢,٢ - خاصية القدرة الميكانيكية المفيدة : $P_2 = f(I_a)$

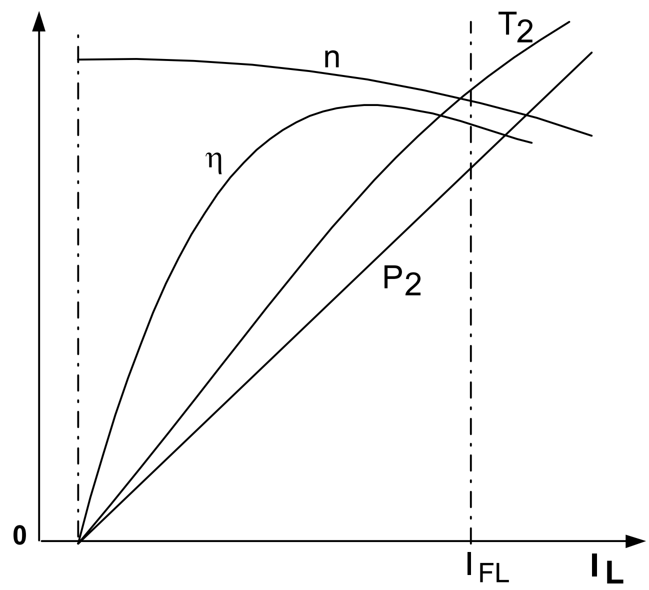
تسحب القدرة الميكانيكية المفيدة P_2 بربط الحمل الميكانيكي لعمود الإدارة و إذا كانت η هي كفاءة المحرك : $P_2 = T_2 w_m = \eta V_t \cdot (I_a + I_f)$

في منطقة التشغيل العادي تزيد P_2 تقريبا خطيا من الصفر بزيادة تيار المنتج I_a عن قيمته $I_{a,0}$ عند اللاحمل (الشكل ٧١,١) . تكون القيمة العظمى أكبر من القيمة الاسمية أو الحمل الكامل (٣ إلى ٤ أضعاف) لكنها تحصل عند كفاءة ضعيفة . محرك التيار المستمر بسبب عضو التبديل حساس جدا للتيارات العالية حتى و لو كانت مؤقتة لذا يجب تخفيض التيار عند بدء الحركة . تسليط جهد المصدر الكامل مباشرة عند السكون لبدء الحركة يكون إلا على دائرة منتج المحركات الصغيرة والتي تدور أحمال ضعيفة، مع هذا فإن الاستثارة توالي تبقى هي المفضلة لأن عزم بدء الحركة يكون أكبر. عند I_a معين ، P_2 تكون متعلقة إلا قليلا بتيار المجال I_f لأن زيادة هذا الأخير تزيد في العزم لكنها تخفض السرعة تقريبا بنفس النسبة ، نقول في هذه الحالة إن للمحرك قدرة ثابتة .

٥,٢,٢ - خاصية الكفاءة : $\eta = f(I_a)$

الكفاءة تعطى بالعلاقة $\eta = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_f}$ و هي تساوي صفرا عند $I_a = I_{a,0}$ ، تزيد بزادة التحميل فتمر بقيمة عظمى ثم تنخفض . شكل الكفاءة مماثل تقريبا لجميع الآلات الكهربائية

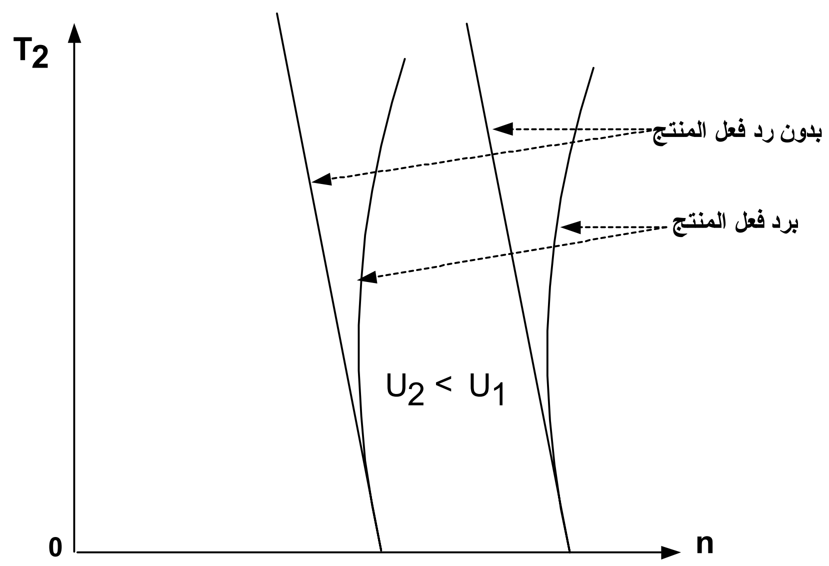
يمكن تجميع منحنيات الخواص الأربع في شكل واحد (الشكل ٧١,١) .



الشكل ٧١,١ : خواص المحرك التوالي عند التحميل

٦,٢,٢ الخاصية الميكانيكية : $T_2 = f(n)$

كيف يتجاوب محرك التوازي مع الحمل الموصل لعمود إدارته ؟ لنفترض زاد عزم الحمل المقوم T_r على عمود إدارة المحرك التوازي ، في هذه الحالة يفوق عزم الحمل العزم المفيد T_2 المتولد فيبدأ المحرك في التباطؤ أي تنخفض السرعة حينئذ يهبط الجهد المتولد $\downarrow E_a = k_a \Phi w_m \downarrow$ ، يزيد تيار المنتج حسب العلاقة $I_a = \frac{V_t - E_a \downarrow}{R_a}\uparrow$ و تبعا لهذا يرتفع العزم الكهرومغناطيسي $\uparrow T_m = k_a \Phi I_a \uparrow$ و بالتالي $T_2 = \uparrow T_m - T_f$ ↑ و في النهاية $T_2 = T_r$ لكن الآن عند سرعة دوران أقل .



الشكل ٧٢,١ : تغير عزم المحرك التوازي مع السرعة

لقيمة معينة لتيار المنمتج I_a تحصلنا على قيمة للسرعة n و قيمة للعزم T_2 أي إحداثيات نقطة للرسم البياني $n = f(T_2)$ الذي يسمى بمنحنى الخاصية الميكانيكية والتي يمكن إيجادها بإلغاء I_a في علاقتي العزم و السرعة على النحو التالي :

$w_m = \frac{V_t - I_a R_a}{k_a \Phi}$ أو $I_a = \frac{V_t - k_a \Phi w_m}{R_a}$ و نعوضها في علاقة العزم $T_m = k_a \Phi I_a$ فتعطي :

$T_m = k_a \Phi \left(\frac{V_t - k_a \Phi w_m}{R_a} \right)$ و التي بعد التعديل يمكن كتابتها على الشكل التالي :

$w_m = \frac{V_t}{k_a \Phi} - \frac{R_a}{(k_a \Phi)^2} T_m$ و مادام $T_m = T_2 - T_f$ و $w_m = 2\pi \frac{n}{60} rd/\sec$ يمكن إعادة كتابتها على هذا الشكل :

$$n = k_4 - k_5 T_2 \qquad (٦٢,١)$$

n باللفة/ الدقيقة ، k_4 و k_5 ثابتان : $k_4 = \frac{60}{2\pi k_a \Phi}\left(V_t + \frac{R_a T_f}{k_a \Phi}\right)$

$k_5 = \frac{60 R_a}{2\pi (k_a \Phi)^2}$ و فيهما جهد المصدر V_t و التدفق المغناطيسي Φ ثابتان و إن كانا غير ذلك فسيؤثران في شكل منحنى العزم بالسرعة .

العلاقة $n = k_4 - k_5 T_2$ تمثل معادلة خط مستقيم بميل سالب و تبين أنه إذا كان V_t و Φ ثابتين تنقص السرعة إلا قليلا عند زيادة العزم فمحرك التوازي يتحكم ذاتيا في سرعته . (الشكل ٧٢,١)

الخاصية $n = f(T_2)$ التي تبقى فيها السرعة تقريبا ثابتة عند التحميل تسمى بخاصية التوازي وهذا مهما يكون المحرك الذي يعطيها .

هنالك فعل داخلي آخر في المحرك يمكن أن يؤثر في شكل منحنى السرعة بالعزم ألا وهو رد فعل المنتج .

إذا كان للمحرك رد فعل للمنتج ، فعند زيادة التحميل ، تيار المنتج يولد تدفق مغناطيسيا خاصا به يعاكس به التدفق المغناطيسي الرئيسي للأقطاب فيضعفه فتزيد السرعة لأي حمل عن قيمتها بدون رد فعل المنتج : رد فعل المنتج يحسن تنظيم سرعة محرك التيار المستمر من نوع الاستثارة توازي (الشكل٧٢,١).

إذا كان للمحرك ملفات تعويض ، طبعا في هذه الحالة يبقى التدفق المغناطيسي ثابتا .

٣,٢- التحكم في سرعة المحرك التوازي :

يعتبر المحرك التوازي من المحركات التي لها سرعة تقريبا ثابتة مع كل الأحمال ابتداء من اللاحمل و حتى عند الحمل الكامل ، و بذلك يمكن إهمال الهبوط الطفيق الذي يقع للسرعة . إذا أردنا تغيير السرعة تغيرا ملحوظا و التحكم فيها يجب استعمال إحدى الطرق التالية التي نستنتجها من معادلة السرعة بالعزم

$$w_m = \frac{V_t}{k_a \Phi} - \frac{R_a}{(k_a \Phi)^2} T_m \quad (٦٣,١)$$

١,٣,٢ - تغيير جهد تغذية المحرك V_t

٢,٣,٢ - التحكم في التدفق المغناطيسي Φ بتوصيل مقاومة متغيرة R_{fc} على التوالي مع دائرة المجال .

٣,٣,٢ - توصيل مقاومة متغيرة على التوالي مع دائرة المنتج فتزيد في مقاومتها . في هذه الحالة إذا كان تيار المجال I_f ثابتا لاتخفض السرعة n_0 عند اللاحمل لكن يكون هبوطها أسرع عند التحميل أي عند زيادة التيار I_a فتنخفض القدرة P_2 و الكفاءة η مما يجعل هذه الطريقة أقل استعمالاً من الطريقتين الأولى و الثانية الأكثر شيوعا .

٤,٢ - استخدام محرك التوازي :

يستخدم محرك التوازي في الحالات التي تحتاج إلى سرعة تقريبا ثابتة أو التي يمكن أن تهبط فيها السرعة إلا هبوطا طفيفا مع ازدياد الحمل مثل آلات الغزل و النسيج ، المخارط ، المقاشط ،الفرايز ، المثاقيب ، إدارة المراوح و الدرافيل ، ماكينات صناعة الورق ، ماكينات صناعة الأخشاب .

و لا يستعمل محرك التوازي في الحالات التي يقوم بها المحرك بالحمل مباشرة لأن عزم دورانه صغير عند بدء الحركة . أخيرا غالبا ما يستبدل محرك التوازي بمحرك الحث الثلاثي الأوجه .

٥,٢- عكس اتجاه محرك التوازي :

تعكس الحركة بعكس اتجاه مرور التيار في عضو الاستنتاج و ذلك بتبديل الطرفين على حامل الفرش (أو باستعمال مفتاح عاكس في دائرة المنتج) أو بعكس تيار المجال بتبديل طرفي ملفات المجال .

يجب الملاحظة هنا أنه عند عكس اتجاه دوران محرك به ملفات تبديل أو ملفات تعويض لابد من عكس اتجاه التيار في المنتج و ملفات التبديل أو التعويض معا كوحدة واحدة و إلا فسوف يؤدي الأمر إلى ازدياد سخونة المحرك أثناء الدوران و حدوث الشرر عند الفرش .

٦,٢- تأثير فتح دائرة المجال على سرعة محرك التوازي :

إذا زادت مقاومة دائرة المجال انخفض تيار المجال عند جهد تغذية طبعا ثابتا $\left(\downarrow I_f = \dfrac{V_t}{\uparrow R_f}\right)$ فيقل $\Phi \downarrow$ وتبعا لذلك تزيد السرعة ($w_m = \dfrac{V_t}{k_a \Phi} - \dfrac{R_a}{(k_a \Phi)^2} T_m$). إذا فتحت دائرة المجال كلية ، يهبط التدفق المغناطيسي إلى التدفق المغناطيسي المتبقي Φ_{res} فتقل القوة الدافعة المغناطيسية $E_a = k_a \Phi_{res} w_m$ هذا سيسبب ارتفاعا عاليا في قيمة تيار المنتج $\uparrow I_a = \dfrac{V_t - \downarrow E_a}{R_a}$ و العزم المتولد $\uparrow T_m = k_a \Phi I_a \uparrow$ و بالتالي العزم المفيد $\uparrow T_2 = \uparrow T_m - T_f$ الذي يصبح أكبر من عزم الحمل T_r مما يسبب في تسارع المحرك وتظل سرعته في زيادة قد تشكل خطرا عليه إن لم تدمره بكامله .

٧,٢ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى : محرك تيار مستمر توازي و ملفوف لفا انطباقيا يسحب تيار خط 63 A من مصدر جهد قدره 120 V عند الحمل الكامل ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.12 Ω و عدد موصلاته ٣٣٨ ، مقاومة ملفات المجال ٤٠ Ω و التدفق المغناطيسي 0.02 Wb لكل قطب . أهمل رد فعل المنتج .

١ - احسب عند الحمل الكامل :

١,١ - تيار الاستثارة I_{f1}

٢,١ - تيار المنتج I_{a1}

٣,١ - القوة الدافعة الكهربائية المضادة E_{a1}

٤,١ - سرعة المحرك n_1

٥,١ - عزم المحرك T_1

٢ - تم توصيل مقاومة إضافية $R_{fc} = 8\Omega$ على التوالي مع ملفات المجال فانخفض العزم إلى ٦٠ % من قيمته عند الحمل الكامل، إذا افترضنا أن التدفق المغناطيسي متناسب مع تيار المجال ، احسب عند هذه الحالة الجديدة :

١,٢ - تيار الاستثارة I_{f2}

٢,٢ - تيار المنتج I_{a2}

٣,٢ - القوة الدافعة الكهربائية المضادة E_{a2}

٤,٢ - سرعة المحرك n_2

الحل :

١ - الحساب عند الحمل الكامل :

١,١ - $I_{f1} = \dfrac{V_t}{R_{fw}} = \dfrac{120}{40} = 3\text{A}$

٢,١ - $I_{a1} = I_{L1} - I_{f1} = 63 - 60 = 60\text{A}$

٣,١ - $E_{a1} = V_t - I_{a1}R_a = 120 - 60 \times 0.12 = 112.8V$

٤,١ - ثابت المحرك $k_a = \dfrac{ZP}{2\pi A} = \dfrac{Z}{2\pi} = \dfrac{338}{2\pi} = 53.79$ ، $A = P$ لأن اللف انطباقي

السرعة الزاوية $w_{m1} = \dfrac{E_{a1}}{k_a \Phi} = \dfrac{112.8}{53.79 \times 0.02} = 104.85 rd/\sec$

سرعة المحرك $n_1 = \dfrac{w_{m1} \times 60}{2\pi} = \dfrac{104.85 \times 60}{2\pi} = 1000$ لفة/دقيقة

٢ - الحساب عند ٦٠ % من الحمل الكامل

١,٢ - $I_{f2} = \dfrac{V_t}{R_{fc} + R_{fw}} = \dfrac{120}{8 + 40} = 2.5\text{A}$

٢,٢ - $\Phi = k_1 I_{f1}$ ، $T_1 = k_a \Phi I_a = k_2 I_{f1} I_{a1}$ ، $k_2 = k_a I_{f1}$

$$T_2 = k_2 I_{f2} I_{a2} \quad ، \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{I_{f2}}{I_{f1}} \times \frac{I_{a2}}{I_{a1}} \quad ، \quad \frac{T_2}{T_1} = ٦٠\ \% = 0.6$$

لذا يكون تيار المنتج الجديد $I_{a2} = I_{a1} \times \frac{T_2}{T_1} \times \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = 60 \times 0.6 \times \frac{3}{2.5} = 43.2\text{A}$

٣,٢ - $E_{a2} = V_t - I_{a2} R_a = 120 - 43.2 \times 0.12 = 114.8V$

٤,٢ - $E_{a2} = k_a \Phi w_{m2} = k_3 I_{f2} n_2 \quad ، \quad k_3 = k_a k_1 \times \frac{2\pi}{60}$

$$E_{a1} = k_3 I_{f1} n_2 \quad ، \quad \frac{E_{a2}}{E_{a1}} = \frac{I_{f2}}{I_{f1}} \times \frac{n_2}{n_1}$$

سرعة المحرك الجديدة :

$n_2 = n_1 \times \frac{E_{a2}}{E_{a1}} \times \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = 1000 \times \frac{114.8}{112.8} \times \frac{3}{2.5} \cong 1220$ لفة/دقيقة

المسألة الثانية : محرك تيار مستمر توازي (12 Kw , 100 V , 1000 r.p.m) ، يغذى من مصدر جهد مستمر قيمته 100 V . مقاومة ملفات المنتج تساوي 0.1Ω و مقاومة ملفات المجال 80Ω . عند اللاحمل ، يدور المحرك بسرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة و منتجه يسحب تيار 6 A من المصدر . منحنى التمغنط لهذا المحرك عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يعطى في الجدول التالي :

$I_f(A)$	0	0.2	0.4	0.6	0.83	0.86	0.99	1.2	1.32	1.4
$E_a(V)$	8.5	31.4	65	77.1	93.5	94.4	99.4	108.5	110	114.2

١ - أوجد قيمة مقاومة التحكم في المجال (R_{fc})

٢ - أوجد المفاقيد الدوارة (المفاقيد الميكانيكية و الحديدية) عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة

٣ - احسب السرعة ، العزم الكهرومغناطيسي (الميكانيكي الكلي)، العزم النافع على عمود الإدارة وكفاءة المحرك عندما يمر التيار الاسمي (تيار الحمل الكامل) في ملفات المنتج في الحالتين الآتيتين :

١,٣ - عندما يحافظ التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية على نفس قيمته عند اللاحمل (أي بدون رد فعل المنتج) .

٢,٣ - عندما ينخفض التدفق في الثغرة الهوائية بـ 5% عند مرور التيار الاسمي في المنتج نتيجة رد فعل المنتج.

٤ - احسب عزم بدء الحركة إذا كان تيار المنتج عند الابتداء يساوي 150% من قيمته الاسمية في الحالتين :

١,٤ - بدون رد فعل المنتج

٢,٤ - عند رد فعل المنتج و تيار مكافىء له $I_{f(A.R)} = 0.16A$

الحل :

١ - عند اللاحمل (No-Load) ، تيار المنتج $I_{a,o} = 6A$

القوة الدافعة الكهربائية المضادة : $E_{a,0} = V_t - I_{a,0} R_a = 100 - 6 \times 0.1 = 99.4V$

من جدول منحنى التمغنط ، توليد ق.د.ك مضادة $E_{a,0} = 99.4V$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يتطلب تيار مجال $I_f = 0.99A$.

$$R_f = R_{fc} + R_{fw} = \frac{V_t}{I_f} = \frac{100}{0.99} = 101\Omega$$

لذا تساوي مقاومة التحكم في المجال : $R_{fc} = 101 - R_{fw} = 101 - 80 = 21\Omega$

٢ - عند اللاحمل تبدّد القدرة الكهرومغناطيسية كمفاقيد دوارة (ميكانيكية و حديدية) في الآلة :

$$P_{mech} + P_{iron} = E_{a,0} I_{a,0} = 99.4 \times 6 = 596.4W$$

٣ - عند التحميل (الحمل الكامل:Full-Load)، تيار المنتج يساوي قيمته الاسمية :

$$I_a = I_{a|rated} = \frac{P_{a|rated}}{V_{t|rated}} = \frac{12000}{100} = 120A$$

١,٣ - بدون رد فعل المنتج ، أي $\Phi_0 = \Phi_{F.L}$

عند اللاحمل : $E_{a,0} = 99.4V$

عند الحمل الكامل : $E_{a|F.L} = V_t - I_{a|F.L} R_a = 100 - 120 \times 0.1 = 88V$

$$w_{m,0} = 2\pi \times \frac{1000}{60} = 104.72 rd/\sec \quad ، \quad \frac{E_{a|F.L}}{E_{a,0}} = \frac{k_a \Phi_{F.L} w_{m,F.L}}{k_a \Phi_0 w_{m,0}} = \frac{w_{m,F.L}}{w_{m,0}}$$

$$w_{m,F.L} = w_{m,0} \frac{E_{a|F.L}}{E_{a,0}} = 104.72 \times \frac{88}{99.4} = 92.71 rd/\sec$$

سرعة المحرك عند الحمل الكامل تساوي إذا :

$$n_{F.L} = \frac{60\, w_{m,F.L}}{2\pi} = \frac{60 \times 92.71}{2\pi} = 885.31 r.p.m$$

العزم الكهرومغناطيسي $T_m = k_a \Phi_{F.L} I_{a|F.L} = \frac{E_{a|F.L} I_{a|F.L}}{w_{m,F.L}} = \frac{88 \times 120}{92.71} = 113.9 N.m$

العـزم النـافع علـى عمـود الإدارة : $T_2 = T_m - T_f$ ، T_f هـو عـزم المفاقيـد الميكانيكيـة و الحديديـة و يساوي $T_f = \frac{P_{mech} + P_{iron}}{w_{m,F.L}} = \frac{596.4}{92.71} = 6.43 N.m$

$$T_2 = 113.9 - 6.43 = 107.47 N.m$$

قدرة الخرج على عمود الإدارة : $P_2 = E_{a|F.L} I_{a|F.L} - (P_{mech} + P_{iron}) = 88 \times 120 - 596.4 = 9963.6W$

أو بطريقة ثانية : $P_2 = T_2 w_{m,F.L} = 107.47 \times 92.47 = 9963.6W$

قدرة الدخل (القدرة التي يسحبها المحرك من المصدر) :

$$P_1 = V_t I_L = V_t (I_{a|F.L} + I_f) = 100(120 + 0.99) = 12099W$$

كفاءة المحرك : $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{9963.6}{12099} \times 100\% = 82.35\%$

٢,٣ - عند رد فعل المنتج ، $\Phi_{F.L} = 0.95 \Phi_0$ ، $\frac{\Phi_{F.L}}{\Phi_0} = 0.95$ أو $\frac{\Phi_0}{\Phi_{F.L}} = \frac{1}{0.95}$

$$w_{m,F.L} = w_{m,0} \times \frac{E_{a|F.L}}{E_{a,0}} \times \frac{\Phi_0}{\Phi_{F.L}} = 104.72 \times \frac{88}{99.4} \times \frac{1}{0.95} = 97.59 rd/\sec$$

سرعة المحرك : $n_{F.L} = \frac{60 w_{F.L}}{2\pi} = \frac{60 \times 97.59}{2\pi} = 931.91 r.p.m$

يمكن الملاحظة أن سرعة المحرك تزيد إذا انخفض التدفق المغناطيسي بسبب رد فعل المنتج

العزم الكهرومغناطيسي : $T_m = \frac{E_{a|F.L} I_{a|F.L}}{w_{m,F.L}} = \frac{88 \times 120}{97.59} = 108.2 N.m$

العزم النافع على عمود الإدارة : $T_2 = T_m - T_f$

عزم المفاقيد الميكانيكية و الحديدية : $T_f = \frac{596.4}{97.59} = 6.11 N.m$ ، (المفاقيد ثابتة ، لم تتغير مع السرعة)

$$T_2 = 108.2 - 6.11 = 102.09 N.m$$

كفـاءة المحـرك : $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{9963.6}{12099} \times 100\% = 82.35\%$ إذا مـا افترضـنا أن المفاقيـد الميكانيكيـة والحديدية لم تتغير مع السرعة .

٤ - حساب عزم بدء الحركة إذا كان تيار المنتج عند الابتداء يساوي 150% من قيمته الاسمية $I_{a|F.L}$

١,٤ - دون رد فعل المنتج :

إذا كان رد فعل المنتج مهملا ، التدفق المغناطيسي عند التحميل يساوي قيمته عند اللاحمل .

$E_{a,0} = 99.4 = k_a \Phi_0 w_{m,0} = k_a \Phi_0 \times 104.72$ فنستنتج إذا $k_a \Phi_{F.L} = k_a \Phi_0 = 0.949 V/rad/\sec$

تيار المنتج عند الابتداء : $I_{a|start} = 1.5 \times I_{a|F.L} = 1.5 \times 120 = 180\text{A}$

عزم بدء الحركة : $T_{m|start} = k_a \Phi_{F.L} I_{a|start} = 0.949 \times 180 = 170.82 N.m$

٢,٤ - عند رد فعل المنتج :

تيار المجال الحقيقي : $I_{f(act)} = 0.99A$ و يكون تيار المنتج عند الابتداء: $I_{a|start} = 180A$

تيار المجال المكافىء لرد فعل المنتج : $I_{f(A.R)} = 0.16A$

تيار المجال الفعلي عند رد فعل المنتج : $I_{f(eff)} = I_{f(act)} - I_{f(A.R)} = 0.99 - 0.16 = 0.83A$

من جدول منحنى التمغنط ، الجهد المتولد المناظر لتيار مجال يساوي 0.83 A هو :

$E_{a(eff)} = 93.5V \left(= k_a \Phi w_m\right)$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة

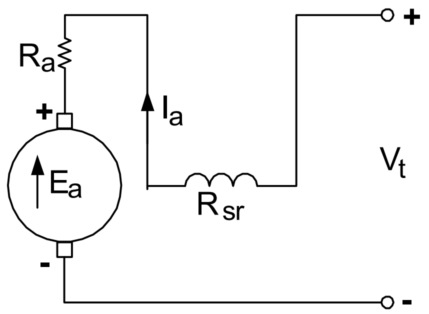
$$k_a \Phi = \frac{93.5}{104.72} = 0.893 V/rad/\sec$$

عزم بدء الحركة : $T_{m|start} = k_a \Phi I_{a|start} = 0.893 \times 180 = 160.71 N.m$

٣- محرك التيار المستمر التوالي

١,٣ - مقدمة :

في هذا المحرك توصل ملفات المجال على التوالي مع دائرة المنتج كما هو مبين في الدائرة المكافئة التالية: يمكن استخدام مقاومة خارجية R_{ae} موصلة على التوالي مع المنتج ، للتحكم في السرعة .



الشكل ٧٣,١ مولد الاستثارة توالي

في محرك التوالي تيار المنتج I_a ، تيار المجال I_f يساوي تيار الخط I_L الذي يسحبه المحرك من المصدر ($I_a = I_f = I_L$) ، يتغير التدفق المغناطيسي إذا مع التحميل ولهذا السبب لمحرك التوالي خصائص معاكسة لمحرك التوازي (أو محرك الاستثارة المنفصلة) . يتسارع هذا المحرك عند بدء الحركة بدون حمل ويأخذ سرعة قد تشكل خطرا عليه ، و بالتالي عند توصيله مباشرة للمصدر ، يجب تحميله بآلة يكون لها عزم مقاوم معتبرا (في المختبر قد تكون مولد استثارة منفصلة أو مكبح كهرومغناطيسي).

في الاستخدام العادي يعطي هذا المحرك قدرة ميكانيكية تقريبا ثابتة ، تهبط سرعته بقوة عند التحميل بينما يتغير العزم بصفة معاكسة لتغير التيار .

٢,٣ - المعادلات التي تتحكم في محرك التوالي

العلاقتان $E_a = k_a \Phi w_m$ و $T_m = k_a \Phi I_a$ صالحتان كذلك لمحرك التوالي ، Φ ناتج عن تيار المنتج الذي يمر في ملفات المجال .

معادلة قانون كرشوف لمجموع الجهود لهذا المحرك :

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{sr} + R_{ae}) \quad (٦٤,١)$$

إن خاصية العزم لمحرك التوالي تختلف كثيرا عن نظيرتها في محرك التوازي . إن الأداء الأساسي لمحرك التوالي يكمن في كون التدفق المغناطيسي متناسباً طردا مع تيار المنتج إذا افترضنا أن العلاقة المغناطيسية خطية و إلا على الأقل قبل الوصول إلى مرحلة التشبع : $k_a \Phi = k_{sr} I_a$

عند ازدياد الحمل على المحرك (يزيد I_a) فيزيد التدفق المغناطيسي Φ فتنخفض السرعة بقوة $w_m = \dfrac{V_t - I_a(R_a + R_{sr} + R_{ae})}{\Phi}$.

يمكن إعادة كتابة علاقة العزم الكهرومغناطيسي المتولد $T_m = k_a \Phi I_a$ بتعويض $k_a \Phi = k_{sr} I_a$ فنتحصل على المعادلة التالية :

$$T_m = k_{sr} I_a^2 \quad (٦٥,١)$$

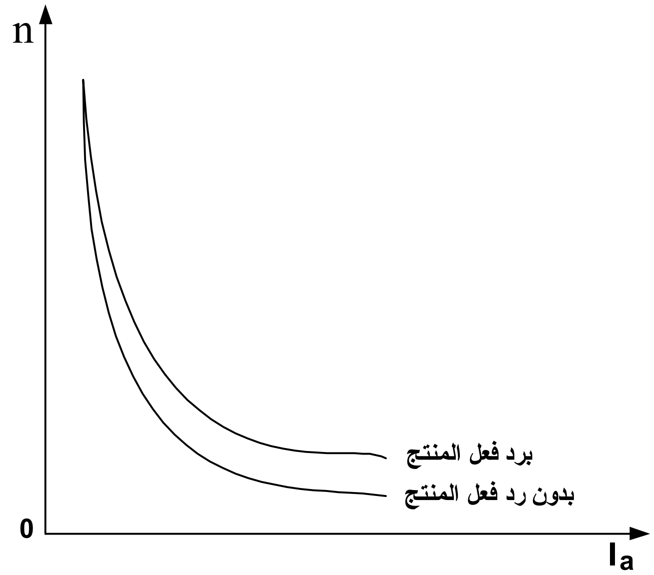
، k_{sr} ثابت محرك التوالي .

هذه المعادلة تبين أن محرك التوالي سينتج عزما موحد الاتجاه للتيار المستمر و المتردد ، وهو متناسب مع مربع تيار المنتج . كما أن المعادلة تظهر و بوضوح تام أن محرك التوالي يعطي عزما لوحدة التيار أكبر من أي عزم في أي محرك آخر خاصة عند الإبتداء .

العزم المفيد على عمود الدوران يعطى هو أيضا بالعلاقة : $T_2 = T_m - T_f$ ، T_f عزم المفاقيد الحديدية والميكانيكية $T_f = \dfrac{P_{mech} + P_{iron}}{w_m} \cong \dfrac{V_t I_{a,0}}{w_m}$ ، $I_{a,0}$ التيار الذي يسحبه المحرك عند اللاحمل .

٣,٣ - خواص محرك التوالي :

١,٣,٣ - خاصية $n = f(I_a)$ ، V_t ثابت



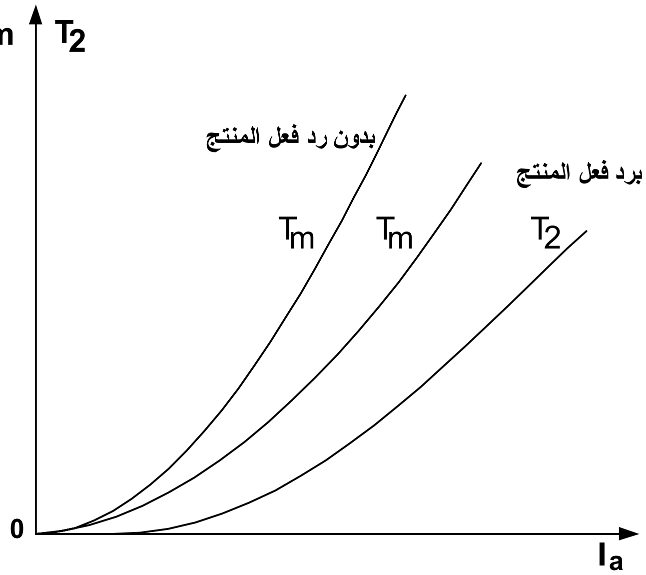
الشكل ٧٤,١ : تغير سرعة المحرك التوالي مع تيار المنتج

تعطى السرعة أيضا بالعلاقة لفة / دقيقة $n = \frac{V_t - I_a(R_a + R_{sr})}{k_1\Phi}$ ، الثابت $k_1 = \frac{ZP}{60A}$ إلا أنه بالنسبة لمحرك التوالي التدفق Φ يزيد بازدياد التيار الذي يسحبه المحرك من المصدر I_a ، إذا أهملنا هبوط الجهد في مقاومتي ملفات المنتج و المجال، رد فعل المنتج و خاصة تشبع الدائرة المغناطيسية ($\Phi = k_2 I_a$) يمكن التعبير على السرعة بشكل مبسط :

$$n = \frac{V_t}{k_1\Phi} = \frac{k_3}{I_a} \quad \text{الثابت} \quad k_3 = \frac{V_t}{k_1 k_2} \,. \qquad (٦٦,١)$$

المعادلة $n = \frac{k_3}{I_a}$ قليلا فتكون السرعة عالية . و عندما يكون الحمل كبيرا ، يكون تيار المنتج كبيرا وتكون سرعة الدوران منخفضة . إذا كانت الآلة لاتحتوي على مافات تعويض يخفض رد فعل المنتج زيادة التدفق Φ ، الشكل ٧٤,١ يبين المنحنى الحقيقي $n = f(I_a)$ ، نلاحظ أن سرعة محرك التوالي متغيرة جدا . عند اللاحمل ، يجمح محرك التوالي (يتسارع بقوة) و سرعته تكون أكبر من تلك التي يمكنه أن يتحملها ميكانيكيا . لذا يجب تفادي تشغيل المحرك بدون حمل ، كما لايسمح أيضا أن يكون بين محرك التوالي و الآلة التي يدورها وسيلة نقل للقدرة يمكن أن تنفصل أو تنزلق .

٢,٣,٣- خاصية العزم $T_m = f(I_a)$ ، $T_2 = f(I_a)$



الشكل ٧٥,١ : تغير عزم المحرك النوالي مع تيار المنتج

إذا كانت الدائرة المغناطيسية للمحرك غير متشبعة ، التدفق المغناطيسي Φ متناسب مع تيار المنتج ، خاصة عند الأحمال الخفيفة و كما سبق و أن توصلنا إليه فإن العزم الكهرومغناطيسي يعطى بالمعادلة : $T_m = k_{sr} I_a^2$ ، العزم متناسب تربيعيا مع تيار المنتج (parabola) في البداية ، لكن عند ازدياد التحميل بحيث تتشبع الدائرة المغناطيسية يكون التدفق Φ تقريبا ثابتا و يكون العزم $T_m \cong k_5 I_a$ و هي معادلة خط مستقيم ، $k_5 = k_a \Phi$ ميل الخط ، إذا عند الوصول إلى منطقة التشبع ، يقترب المنحنى من الخط المستقيم أكثر فأكثر دون أن يصله تماما (الشكل٧٥,١) . وبسبب انخفاض التدفق نتيجة رد فعل المنتج يمثل العزم بالمنحنى المبين في الشكل .

العزم النافع T_2 على عمود الدوران عند الخرج نتحصل عليه بطرح عزم المفاقيد الحديدية و الميكانيكية T_f من العزم الكهرومغناطيسي : $T_2 = T_m - T_f$. إذا افترضنا أن المفاقيد الميكانيكية متناسبة مع السرعة ، فإن هبوط العزم الناتج عنها يكون ثابتا . تزيد المفاقيد الحديدية مع التدفق لكنها تنخفض مع التردد ، وتتغير إلا قليلا مع التيار و بسبب تناقص السرعة فإن انخفاض العزم التي تحدثه يزيد مع التيار . T_f لايتغير إلا قليلا مع جهد المصدر . منحنى $T_2 = f(I_a)$ ممثل في الشكل٧٥,١ .

٣,٣,٣- خاصية القدرة الميكانيكية النافعة : $P_2 = f(I_a)$

للقدرة النافعة عند خرج المحرك العلاقة :

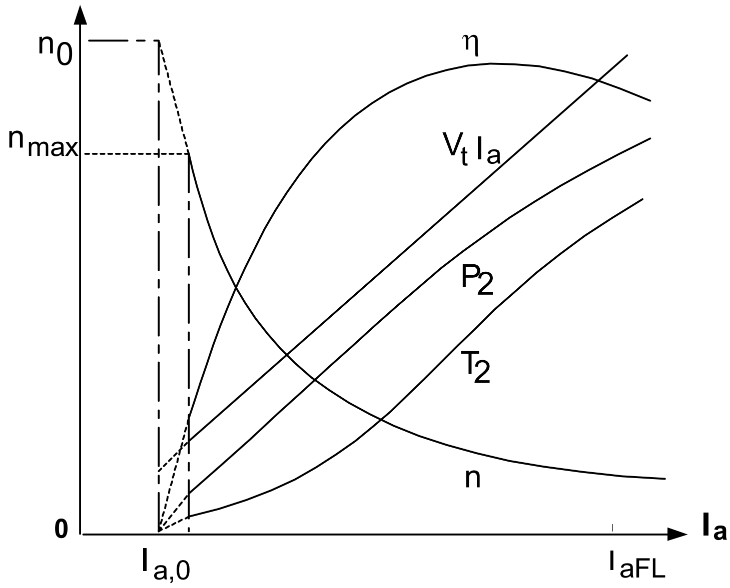
$$\begin{aligned} P_2 &= 2\pi n T_2 \\ &= V_t I_L - P_{cu} - P_{mech} - P_{iron} \\ &= \eta V_t I_L \end{aligned}$$

تزيد القدرة النافعة P_2 بازدياد التيار ثم تمر على قيمة عظمى لقيمة تيار أكبر بكثير من القيمة الاسمية وهي مبينة في الشكل ٧٦،١ .

٤،٣،٣ - خاصية الكفاءة : $\eta = f(I_a)$

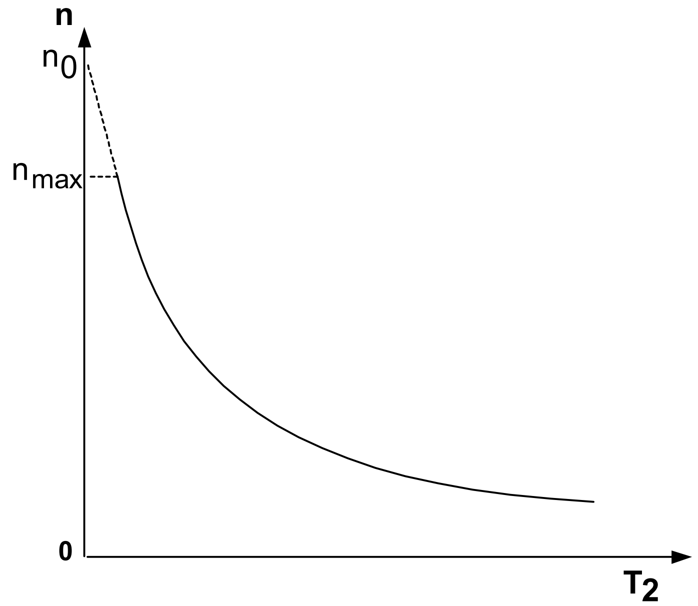
الكفاءة تعطى بالعلاقة $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_f}$ و هي تساوي صفرا عند $I_a = I_{a,0}$ ، تزيد بزيادة التحميل فتمر بقيمة عظمى ثم تنخفض . شكل الكفاءة مماثل تقريبا لجميع الآلات الكهربائية (الشكل٧٦،١) .

يمكن تجميع منحنيات الخواص الأربع في شكل واحد (الشكل٧٦،١) .



الشكل ٧٦،١ : خواص محرك التوالي عند التحميل

٥,٣,٣ - الخاصية الميكانيكية : $n = f(T_2)$



الشكل ٧٧,١ : تغير سرعة المحرك التوالي مع العزم

لتعيين هذه الخاصية نفترض أن منحنى المغناطيسية خطيا كما سبق ذكره .و نتحصل عليها بكتابة معادلتي القوة الدافعة الكهربائية : $E_a = V_t - I_a(R_a + R_{ae} + R_{sr})$ ، $E_a = k_{sr} I_a w_m$

مما يعطي $w_m = \dfrac{V_t - I_a(R_a + R_{ae} + R_{sr})}{k_{sr} I_a}$ ، من المعادلة $T_m = k_{sr} I_a^2$ نجد $I_a = \sqrt{\dfrac{T_m}{k_{sr}}} = \dfrac{\sqrt{T_m}}{\sqrt{k_{sr}}}$ و نعوضه في معادلة السرعة فنتحصل على معادلة السرعة التالية : $w_m = \dfrac{V_t}{\sqrt{k_{sr}}\sqrt{T_m}} - \dfrac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{k_{sr}}$ يمكن أيضا إعادة كتابتها بالعزم T_2 و السرعة n :

$$n = \frac{V_t}{\frac{2\pi}{60}\sqrt{k_{sr}}\sqrt{T_m}} - \frac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{\frac{2\pi}{60}\sqrt{k_{sr}}} \quad \text{لفة/دقيقة} \qquad (٦٧,١)$$

لقيمة معينة للمقاومة الخارجية R_{ae} ، تكون السرعة تقريبا متناسبة عكسيا مع جذر تربيع العزم T_2 ،عندما يزيد T_2 تهبط السرعة بقوة ، فنحصل على عزم قوي عند سرعة منخفضة و عزم ضعيف عند سرعة عالية ، هذه الخاصية تسمى خاصية التوالي مهما كان المحرك الذي يعطيها (الشكل٧٧,١) محرك التوالي مستقر جدا مادام يتباطأ بصورة ملحوظة عندما نحمله ، نقول عليه في هذه الحالة إنه يتحكم ذاتيا في القدرة فزيادة القدرة تكون أقل من زيادة العزم النافع الذي نطلبه منه .

أحد عيوب محركات التوالي كما و أن سبق ذكره يمكن ملاحظته مباشرة من معادلة السرعة ، عندما يكون العزم صفرا تزيد السرعة إلى قيمة مالانهاية لها ، في الواقع العزم لايمكنه أن يكون صفرا

بسبب المفاقيد الموجودة حتى عند اللاحمل كالمفاقيد الميكانيكية ، الحديدية و الشاذة التي يجب التغلب عليها . رغم هذا فإن عند اللاحمل تكون سرعة المحرك كبيرة جدا قد تشكل خطرا عليه .

٤,٣ - تنظيم سرعة محرك التوالي

يمكن تنظيم سرعة محرك التوالي بإحدى الطرق الآتية :

١,٤,٣ بتوصيل مقاومة متغيرة R_1 على التوالي مع المحرك (الجهد V_t ثابت) ، مما يزيد في مقاومة هذا الأخير . لتيار معين I_a ، تهبط السرعة و تنزل من القيمة n إلى القيمة n' حسب التناسب التالي :

$$\frac{n'}{n}=\frac{V_t-I_a\left(R_a+R_{sr}+R_1\right)}{V_t-I_a\left(R_a+R_{sr}\right)}$$

- يحافظ العزم على نفس القيمة $T_m=k_{sr}I_a^2$
- القدرة الميكانيكية النافعة $P_2^{'}=2\pi n'T_m-\left(P_{mech}^{'}+P_{iron}^{'}\right)$ تنخفض تقريبا كالسرعة
- تهبط الكفاءة بسبب زيادة المفاقيد النحاسية في المقاومة R_1
- انخفاض الخاصية الميكانية يكون أسرع

إضافة مقاومة على التوالي مع دائرة المحرك تقنية مبددة للقدرة وهي تستخدم في المراحل المؤقتة عند بدء حركة بعض المحركات ، خارج عملية بدء الحركة تستخدم بعض الأحيان في المحركات الصغيرة للحصول على تعدد السرعة عند التحميل .

٢,٤,٣ - بتغير جهد تغذية المحرك V_t (باستخدام إلكترونيات القدرة)

إذا كان التيار I_a ثابتا ،

- العزم T_m غير متعلق بجهد التغذية
- السرعة تقريبا متناسبة مع جهد التغذية ، إذا تغير الجهد من V_t إلى $V_t^{'}$ تمر السرعة من n لى n' بحيث :

$$\frac{n'}{n}=\frac{V_t^{'}-I_a\left(R_a+R_{sr}\right)}{V_t-I_a\left(R_a+R_{sr}\right)}$$

- القدرة P_1 التي يسحبها المحرك من المصدر متناسبة مع الجهد
- القدرة الميكانيكية النافعة P_2 تقريبا متناسبة مع الجهد
- تنخفض الكفاءة عندما يهبط الجهد V_t لأن انخفاض المفاقيد يكون أقل سرعة من P_2 خاصة و أن كل المفاقيد النحاسية ثابتة .

إن محرك التوالي حسّاس جدا لتغيرات الجهد مادام عند عزم T_m معين تكون السرعة n تقريبا متناسبة مع الجهد V_t . نستخدم هذه الخاصية في تنظيم سرعة المحرك التوالي . في عملية الجر الكهربائي

للقطارات نغير أحيانا توصيل محركات نفس العربية : عند السرعات المنخفضة نوصل المحركات على التوالي ، بينما عند السرعات العالية نوصلها على التوازي .

٣,٤,٣ - بتوصيل مقاومة على التوازي مع ملفات المجال (الجهد V_t ثابت)

لتخفيض التدفق المغناطيسي لكل قطب و بالتالي زيادة السرعة حسب نسب معتبرة ، يمكن توصيل مقاومة R_h على التوازي مع ملفات المجال ذات المقاومة R_{sr} ، يمر في هذه الأخيرة التيار $I_a^{'}$ و يكون يساوي : $I_a \frac{R_h}{R_{sr}+R_h}$ ، يجب أن لا تنزل R_h إلى الصفر و إلا $\Phi = 0$ و يجمح المحرك .

لتيار I_a معين ، تزيد السرعة إذا ما انخفضت النسبة $\frac{I_a^{'}}{I_a}$ ، $\frac{n'}{n} = \frac{\Phi}{\Phi^{'}}$ (هبوط التدفق يزيد في السرعة)

لكن بالعكس ينقص العزم و يكون غير متعلق بالجهد ، مادام $\frac{T_m^{'}}{T_m} = \frac{\Phi^{'}}{\Phi}$ عزم المفاقيد يحتفظ تقريبا على نفس القيمة : هناك انخفاض للمفاقيد الحديدية مادام هبط التدفق لكن تعوضه زيادة المفاقيد الميكانيكية التي تتناسب مع السرعة $(n' \rangle n)$ ، كما أن العزم النافع T_2 يبقى هو الآخر غير متعلق بالجهد .

إن هذه الطريقة تشكل الطريقة الطبيعية لتنظيم سرعة محرك التوالي إلا أن زيادة السرعة تكون على حساب العزم الذي يولده المحرك .

٥,٣ - عكس حركة محرك التوالي

يمكن عكس اتجاه دوران محرك التوالي بعكس اتجاه التيار في عضو الاستنتاج أو عكس اتجاه تيار نلفات المجال .

٦,٣ - استخدام **محركات التوالي**

تستخدم محركات التيار المستمر ذات الاستثارة توالي في الأحمال التي تتطلب عزم دوران كبير عند بدء الحركة و التي يكون فيها الحمل متصلا مباشرة بعمود الإدارة كما في القطارات الكهربائية ، محركات بدء حركة السيارات ، في الأوناش و الرافعات و المصاعد و الطاحونات .

٧,٣ - مسائل محلولة :

المسألة الأولى : محرك تيار مستمر من نوع استثارة توالي ، عدد أقطابه ٢ ، ملفوف لفا تموجيا و موصل على مصدر جهد مستمر قدره 500 V . يسحب هذا المحرك تيار 60 A من المصدر و عند الحمل الكامل . مقاومة ملفات عضو الاستنتاج تساوي 0.15 Ω و عدد موصلاته الفعالة ٤٠٠ ، مقاومة ملفات المجال 0.1Ω ، التدفق المغناطيسي 0.0255 Wb لكل قطب .

١ - احسب عند الحمل الكامل :

١,١ -القوة الدافعة المغناطيسية المضادة E_{a1}

٢,١ - سرعة المحرك n_1

٣,١ - عزم المحرك الكلي T_{m1}

٢ - إذا انخفض العزم الآن إلى 60% من قيمته عند الحمل الكامل ،و بافتراض أن التدفق المغناطيسي متناسب مع تيار المجال ، أوجد لهذه الحالة الجديدية :

١,٢ - التيار I_{a2} الذي يسحبه المحرك الآن من المصدر

٢,٢ - القوة الدافعة المغناطيسية المضادة E_{a2}

٣,٢ - سرعة المحرك n_2

الحل :

١ - الحساب عند الحمل الكامل :

في محرك التوالي كل التيارات متساوية : $I_a = I_f = I_L$

١,١ - الق.د.ك المضادة : $E_{a1} = V_t - I_{a1}(R_a + R_{sr}) = 500 - 60 \times (0.1 + 0.15) = 485V$

٢,١ - ثابت محرك التوالي : $k_a = \dfrac{ZP}{2\pi A} = \dfrac{400 \times 2}{2\pi \times 2} = 63.66$ ،

A=2 (عدد دوائر ملفات المنتج على التوازي في حالة اللف التموجي يساوي ٢)

السرعة الزاوية : $w_{m1} = \dfrac{E_{a1}}{k_a \Phi} = \dfrac{485}{63.66 \times 0.0255} = 298.77 rad/\sec$

سرعة المحرك : $n_1 = \dfrac{60\, w_{m1}}{2\pi} = \dfrac{60 \times 298.77}{2\pi} = 2853 r.p.m$

٣,١ - عزم المحرك الكلي : $T_{m1} = k_a \Phi I_{a1} = 63.66 \times 0.0255 \times 60 = 97.4 N.m$

٢ - $\dfrac{T_{m2}}{T_{m1}} = 0.6$ ، $\dfrac{T_{m2}}{T_{m1}} = \dfrac{k_{sr} I_{a2}^2}{k_{sr} I_{a1}^2} = \left(\dfrac{I_{a2}}{I_{a1}}\right)^2$

١,٢ - التيار I_{a2} الذي يسحبه المحرك الآن من المصدر : $I_{a2} = I_{a1}\sqrt{\dfrac{T_{m2}}{T_{m1}}} = 60 \times \sqrt{0.6} = 46.47\text{A}$

٢,٢ - الق.د.ك المضادة : $E_{a2} = V_t - I_{a2}(R_a + R_{sr}) = 500 - 46.47 \times (0.1 + 0.15) = 488.4V$

٣,٢ - سرعة المحرك : $n_2 = n_1 \times \left(\dfrac{E_{a2}}{E_{a1}}\right) \times \left(\dfrac{I_{a1}}{I_{a2}}\right) = 2853 \times \left(\dfrac{488.4}{485}\right) \times \left(\dfrac{60}{46.47}\right) = 3710 r.p.m$

-المسألة الثانية : محرك تيار مستمر من نوع استثارة توالي موصل ميكانيكيا لمروحة ، يسحب تيار شدّته 25 A و يدور بسرعة مقدارها ٣٠٠ لفة/دقيقة عندما يغذى من 220 V مصدر جهد مستمر و بدون

مقاومة إضافية لملفات المنتج $(R_{ae}=0)$. العزم الذي تتطلبه المروحة متناسب مع السرعة تربيع . مقاومة ملفات المنتج تساوي 0.6 Ω و مقاومة ملفات مجال التوالي 0.4 Ω . يمكن إهمال رد فعل المنتج و المفاقيد الميكانيكية و الحديدية .

١ - أوجد القوة الدافعة الكهربائية المضادة المتولدة في ملفات المنتج E_a

٢ -أوجد القدرة الميكانيكية P_2 التي يعطيها المحرك للمروحة

٣ - احسب العزم الذي يولده المحرك على عمود الإدارة T_2

٤ - تخفض السرعة الآن إلى ٢٠٠ لفة/دقيقة بإضافة مقاومة (R_{ae}) إلى دائرة المنتج . أوجد لهذه السرعة الجديدة :

٤,١ عزم المحرك على عمود الإدارة

٢,٤ - القدرة الميكانيكية التي يعطيها المحرك للمروحة

٣,٤ -مقدار المقاومة (R_{ae}) التي أضيفت لدائرة المنتج .

الحل :

١ -.د.ك المضادة $E_a=V_t-I_a(R_a+R_{sr}+R_{ae})=220-25(0.6+0.4+0)195V$

٢ - القدرة الميكانيكية التي يعطيها المحرك للمروحة :

$$P_2=E_aI_a-(P_{mech}+P_{iron})=195\times25-0=4875W$$

٣ - **عزم المحرك على عمود الإدارة :** $T_2=\dfrac{P_2}{w_m}=\dfrac{4875}{2\pi\times\dfrac{300}{60}}=155.18N.m$

٤ - تنخفض السرعة الآن إلى ٢٠٠ لفة/دقيقة بإضافة مقاومة (R_{ae}) لدائرة المنتج .

١,٤ - ثابت محرك التوالي : $T_2=T_m=k_{sr}I_a^2$ لأن $T_f=0$

$155.18=k_{sr}25^2$ هذا يعطي إذا $k_{sr}=0.248$

العزم الذي تتطلبه المروحة متناسب مع تربيع السرعة : $T_{2|200rpm}=C(200)^2$ ، C ثابت

$$T_{2|300rpm}=C(300)^2$$

العزم الذي يولده المحرك على عمود الإدارة عند السرعة 200 لفة/دقيقة :

$$T_{2|200rpm}=T_{2|300rpm}\times\left(\frac{200}{300}\right)^2=155.18\times\left(\frac{200}{300}\right)^2=68.97N.m$$

٢,٤ - القدرة الميكانيكية التي يعطيها المحرك الآن للمروحة :

$$P_2=T_2\times w_m=68.97\times2\pi\times\frac{200}{60}=1445.5W$$

٣,٤ - يمكن الحصول على مقدار المقاومة (R_{ae}) التي أضيفت لدائرة المنتج باستعمال طريقتين للحل :

الطريقة الأولى :

تعطى سرعة محرك التوالي بالعلاقة : $w_m = \frac{V_t}{\sqrt{k_{sr}}\sqrt{T_m}} - \frac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{k_{sr}}$

$$2\pi \times \frac{200}{60} = \frac{220}{\sqrt{0.248\sqrt{68.97}}} - \frac{0.6 + 0.4 + R_{ae}}{0.248}$$

$$20.94 = 53.19 - \frac{1 + R_{ae}}{0.248}$$

$$\frac{1 + R_{ae}}{0.248} = 53.19 - 20.94 = 32.25$$

$$1 + R_{ae} = 0.248 \times 32.25 \cong 8$$

$$R_{ae} = 7\Omega$$

الطريقة الثانية :

تيار المنتج عند السرعة ٢٠٠ لفة/دقيقة : $T_2 = T_m = k_{sr} I_a^2$

$$68.97 = 0.248\, I_a^2$$

$$I_a = \sqrt{\frac{68.97}{0.248}} = 16.68\text{A}$$

القوة الدافعة الكهربائية المضادة (الق.د.ك المضادة) : $E_a = k_{sr} I_a w_m = 0.248 \times 16.68 \times 2\pi \times \frac{200}{60} = 86.64V$

قانون كرشوف لمجموع الجهود حول الحلقة يعطي كذلك :

$$E_a = V_t - I_a (R_a + R_{sr} + R_{ae})$$

$$86.64 = 220 - 16.68(0.6 + 0.4 + R_{ae})$$

$$16.68(1 + R_{ae}) = 220 - 86.64 = 133.36$$

$$1 + R_{ae} = \frac{133.36}{16.68} = 8$$

$$R_{ae} = 7\Omega$$

٤- محركات التيار المستمر المركبة

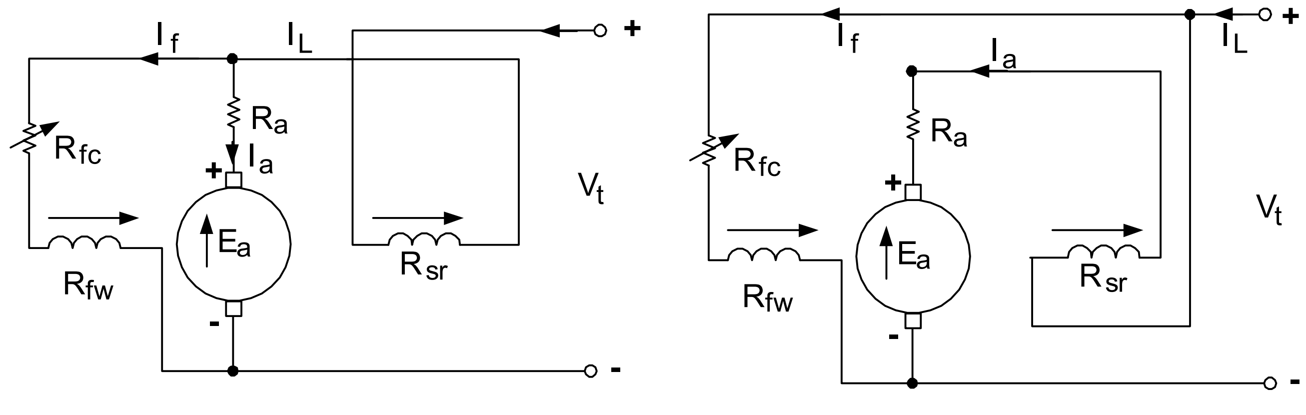
١،٤. - مقدمة :

لنعطي محرك التوازي قليلا من محاسن محرك التوالي (استقرار أفضل ، عزم بدء الحركة أكبر) يمكن إضافة ملفات توالي على الأقطاب و نتحصل بهذا على المحرك المركب . لهذا المحرك إذا ملفان (توازي و توالي) لتوليد المجال المغناطيسي و هو في الأساس محرك توازي و المجال المغناطيسي الرئيسي هو مجال ملفات التوازي . توصل ملفات التوالي بحيث تكون محرك مركب طويل أو محرك مركب قصير كما هو مبين في الشكلين ٧٨،١ و ٧٩،١ .

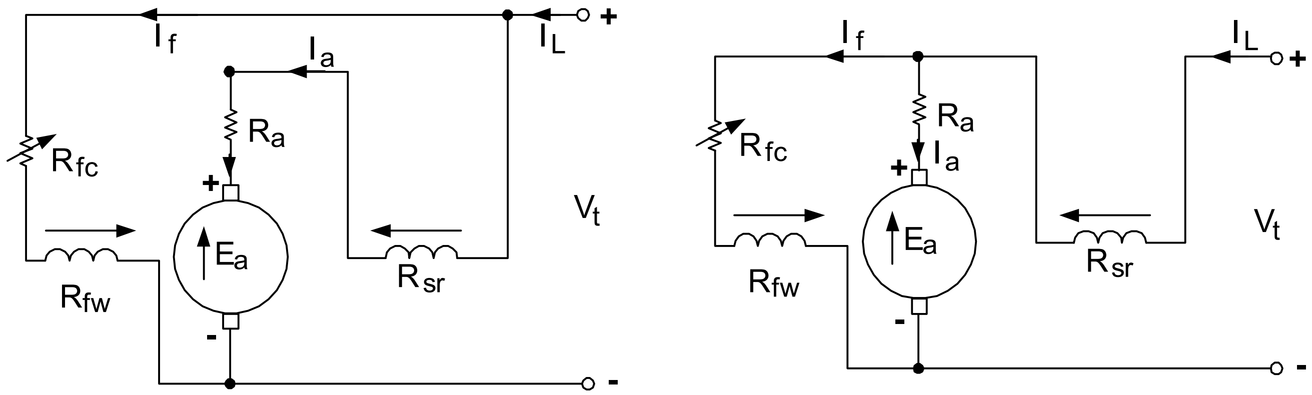
ينقسم المحرك المركب من حيث المجال المغناطيسي إلى نوعين :

أ - محرك مركب تراكمي و فيه يزيد التدفق الكلي و الصافي Φ_{net} بزيادة التحميل حيث يساعد تدفق ملفات التوالي Φ_{sr} التدفق الأصلي لملفات التوازي Φ_{f} (الشكل٧٨،١) .

ب - محرك مركب فرقي أو تفاضلي و فيه يعاكس تدفق ملفات النوالي تدفق ملفات التوازي فينقص التدفق الصافي عند زيادة التحميل (الشكل ٧٩،١).



الشكل ٧٨،١: المحرك المركب التراكمي (طويل و قصير)



الشكل ٧٩،١ : المحرك المركب التفاضلي (قصير و طويل)

ملاحظة : يمكن أن تولد ملفات التوالي تدفقا تحافظ به على قيمة ثابتة لتدفق التوازي و ذلك مهما تغير الحمل .

٢،٤- معادلات المحرك المركب :

١،٢،٤ - محرك التركيب الطويل

$$E_a = k_a \cdot \Phi_{net} \cdot w_m$$

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{sr})$$

$$V_f = V_t = I_f R_f \text{ أو } I_f = \frac{V_t}{R_f} \text{ ، } R_f = R_{fc} + R_{fw}$$

٢،٢،٤ محرك التركيب القصير

$$E_a = k_a \cdot \Phi_{net} \cdot w_m$$

$$V_t = E_a + I_a R_a + I_L R_{sr}$$

$$V_f = I_f R_f = E_a + I_a R_a = V_t - I_L R_{sr}$$

المعادلات المماثلة في كلا الحالين :

$$I_L = I_a + I_f$$

$\Phi_{net} = \Phi_f \pm \Phi_{sr} - \Phi_{A.R}$ ، $\Phi_{A.R}$ التدفق الناتج عن رد فعل المنتج

$T_m = k_a \cdot \Phi_{net} \cdot I_a$ ، $T_2 = T_m - T_f$

$F_{net} = F_f \pm F_{sr} - F_{A.R}$ القوة الدافعة المغناطيسية الصافية

$I_{f(eff)} = I_{f(act)} \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - I_{f(A.R)}$ تيار المجال الفعلي في حالة رد فعل المنتج و $I_{f(act)}$ تيار المجال الحقيقي

حيث $I_{sr} = I_a$ في التركيب الطويل و $I_{sr} = I_L$ في التركيب القصير

الإشارة + تكون للنوع التراكمي بينما الإشارة - للنوع التفاضلي

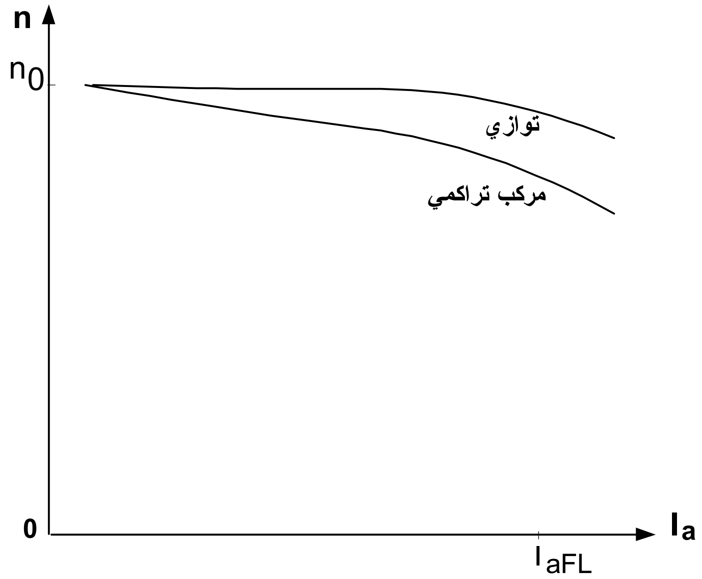
٣،٤- خواص محرك التركيب الطويل التراكمي

في المحرك المكب الطويل التراكمي للتدفق المغناطيسي Φ_{net} مركبتان ، مركبة ثابتة Φ_f و أخرى Φ_{sr} متناسبة مع تيار المنتج و بالتالي مع الحمل بحيث $\Phi_{net} = \Phi_f + \Phi_{sr}$ إذا كان رد فعل المنتج مهملا .

٤،٣،١- **خاصية** $n = f(I_a)$ ، V_t **ثابت**

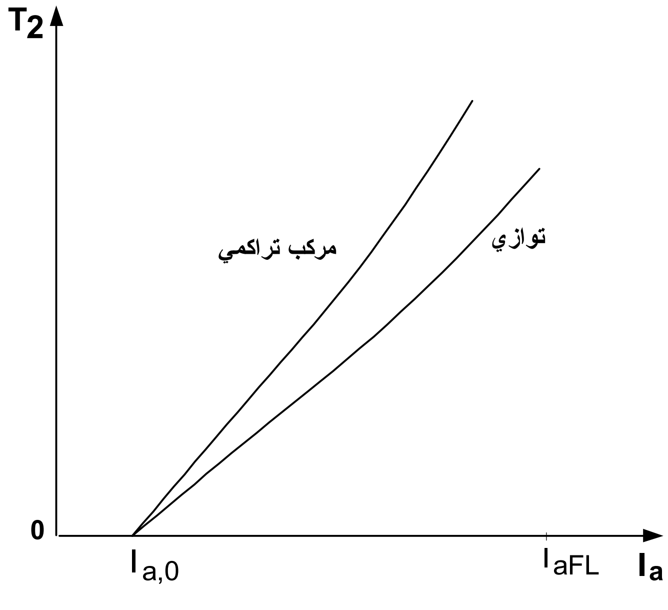
يزيد التدفق المغناطيسي Φ_{net} لتيار مجال I_f معين (V_t ثابت) بزيادة الحمل بسبب تدفق ملفات التوالي الخاصية $n = f(I_a)$ تبدء تقريبا من نفس القيمة n_0 لكن هبوطها يكون أسرع ، عند زيادة التيار I_a ،

على ما هو عليه في محرك التوازي (الشكل ٨٠،١)



الشكل ٨٠،١ : تغير سرعة المحرك المركب التراكمي مع تيار المنتج

-٤،٣،٢ الخاصيتان $T_m = f(I_a)$ و $T_2 = f(I_a)$

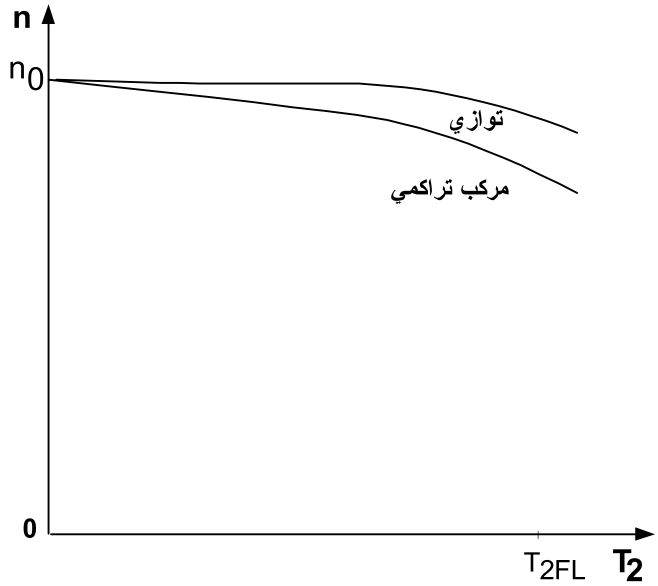


الشكل ٨١،١ : تغير عزم المحرك المركب التراكمي مع تيار المنتج

يزيد العزم عند زيادة التدفق المغناطيسي فالخاصيتان $T_m = f(I_a)$ و $T_2 = f(I_a)$ تبين زيادة أسرع على ماهو عليه في محرك التوازي (الشكل ٨١،١)

٤,٣,٣- خاصيتا $P_2 = f(I_a)$ و $\eta = f(I_a)$: القدرة الميكانيكية النافعة و الكفاءة تبقى تقريبا نفسها كما في محرك التوازي (بدون ملفات توالي إضافية)

٤,٣,٤- الخاصية الميكانيكية : $n = f(T_2)$



الشكل ٨٢,١ : تغير سرعة المحرك المركب التراكمي مع العزم

الخاصية الميكانيكية لمحرك التركيب الطويل التراكمي تهبط أكثر ماهو عليه في محرك التوازي .

عند بدء الحركة ، يولد المحرك المركب التراكمي عزما أقوى من الذي يولد ه محرك التوازي (الذي تدفقه المغناطيسي ثابت) ، لكن عزمه أضعف من الذي يولده محرك التوالي (الذي تدفقه المغناطيسي متناسب كلية مع تيار المنتج) . المحرك المركب التراكمي يجمع إذا ما بين أحسن خواص المحركين التوازي و التوالي فهو مثل محرك التوالي له عزم فائض عند بدء الحركة و مثل محرك التوازي لا يجمح عند اللاحمل (لا يصل إلى سرعة مرتفعة جدا تكون خطرة عليه) .

عند الأحمال الخفيفة ، يكون لمجال التوالي تأثير ضعيف جدا بحيث يصبح المحرك المركب التراكمي يعمل تقريبا كمحرك التوازي . عند الأحمال العالية ، يكون مجال التوالي مهما جدا بحيث تماثل الخاصية الميكانيكية للمحرك المركب التراكمي الخاصية الميكانيكية لمحرك التوالي .

٤,٤ - تنظيم سرعة المحرك المركب التراكمي :

كل الطرق التي استخدمت لتنظيم سرعة محرك التوازي صالحة أيضا لتنظيم سرعة المحرك المركب التراكمي ، من بينها الطريقة الأنسب إضافة مقاومة متغيرة R_H مع ملفات التوالي و أخرى R_h مع ملفات التوازي .

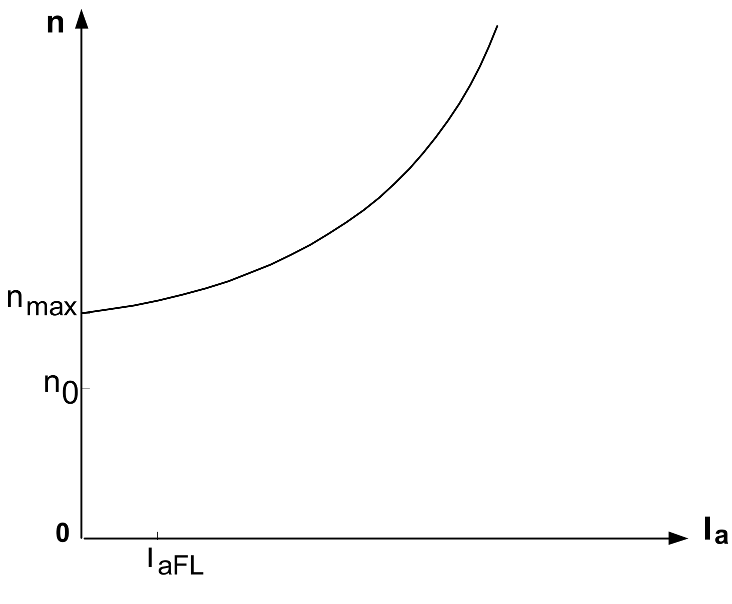
٥,٤ - استخدام المحرك المركب التراكمي :

يستخدم المحرك المركب التراكمي في الحالات التي تتطلب عزم بدء الحركة لا بأس به و سرعة تقريبا ثابتة و المحرك لا يجمح عند اللاحمل كمكينات قص الحديد ، الرافعات .

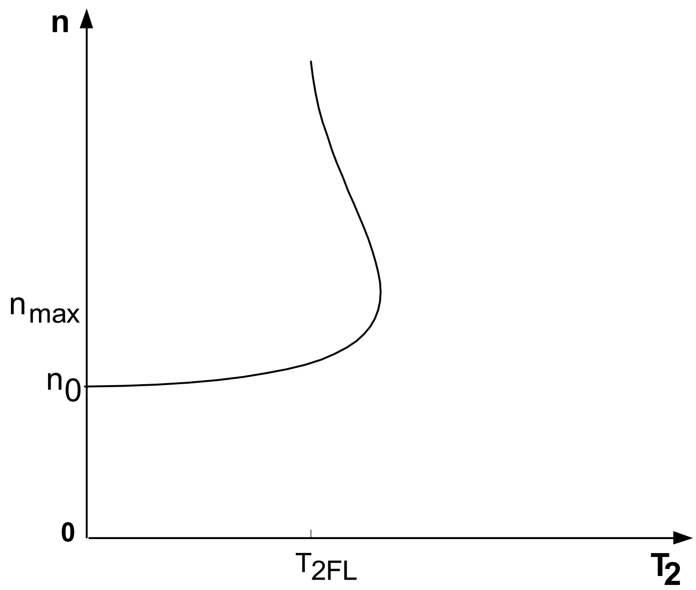
٦,٤ - المحرك المركب التفاضلي :

في المحرك المركب التفاضلي ، يطرح تدفق ملفات التوالي Φ_{sr} من تدفق ملفات التوازي Φ_f ، و بالتالي يمكن للتدفق الصافي الحاصل Φ_{net} أن يساوي صفرا فيسبب في جمح المحرك .

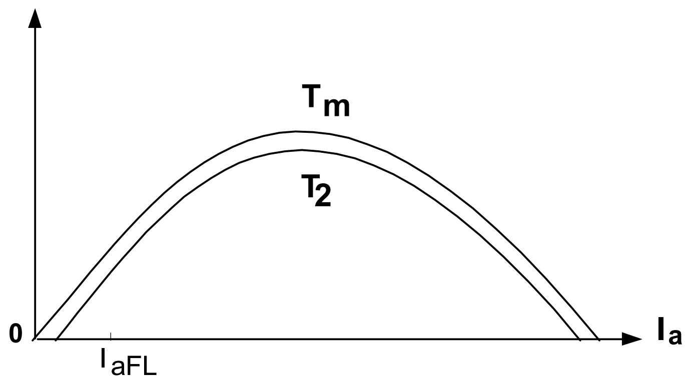
عند زيادة التحميل ، يزيد تيار المنتج فيهبط التدفق المغناطيسي الحاصل مما يسبب في ارتفاع سرعة المحرك . هذا الارتفاع في السرعة يسبب في حد ذاته زيادة إضافية في الحمل التي بدورها ترفع تيار المنتج فينخفض التدفق الحاصل مرة أخرى مما يزيد أيضا في سرعة المحرك (الشكل٨٣,١ و ٨٤,١) . النتيجة هي أن المحرك المركب التفاضلي غير مستقر ، سرعته في ازدياد متواصل قد تؤدي به إلى الجمح ولهذا فهو غير مناسب لأي تطبيق عملي . كما .يزيد عزم المحرك النفاضلي من الصفر بارتفاع تيار المنتج ، يمر بقيمة عظمى قبل ما يبدء في النزول إلى الصفر مرة ثانية (الشكل ٨٤,١)



الشكل ٨٣,١ : تغير سرعة المحرك التفاضلي مع تيار المنتج



الشكل ٨٤,١ : تغير سرعة المحرك التفاضلي مع العزم



الشكل ٨٤,١ : تغير عزم المحرك التفاضلي بتيار المنتج

٧,٤ - سؤال محلول :

يدور محرك التوازي للسؤال الثاني بسرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة و منتجه يسحب تيار 6 A عند اللاحمل .
عند الحمل الكامل و مع تأثير رد فعل المنتج ، يدور المحرك بسرعة ٩٣٢ لفة/دقيقة و منتجه يسحب تيار 120 A . عدد لفات ملفات مجال التوازي ١٢٠٠ .

١ - أوجد تأثير رد فعل المنتج عند الحمل الكامل بالأمبير x عدد لفات ملفات مجال التوازي .

٢ - كم عدد لفات ملفات التوالي لكل قطب التي يجب إضافتها حتى يحول هذا المحرك إلى محرك مركب تراكمي (تركيب قصير) ويدور بسرعة ٨٠٠ لفة/دقيقة عند الحمل الكامل . أهمل مقاومة ملفات التوالي .

٣ - إذا تم الآن إعادة توصيل ملفات التوالي لتحويل المحرك إلى التركيب التفاضلي ، أوجد سرعة المحرك عند الحمل الكامل .

الحل :

١ - من حل السؤال ٢,٧,٢ ، تيار المجال الحقيقي : $I_{f(act)} = 0.99\text{A}$

عند الحمل الكامل : $E_{a(eff)} = V_t - I_a R_a = 100 - 120 \times 0.1 = 88V$ عند السرعة ٩٣٢ لفة/دقيقة

تيار المجال الفعلي $I_{f(eff)}$ الذي يولد $E_{a(eff)}$ يمكن الحصول عليه من منحنى التمغنط (سؤال ٢,٧,٢) بعد ما تحول $E_{a(eff)}$ إلى السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة : $E_{a(eff)} = \frac{88}{932} \times 1000 = 94.4V$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة

من جدول منحنى التمغنط ، تيار المجال الفعلي $I_{f(eff)}$ المناظر للجهد $E_{f(eff)} = 94.4V$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يساوي : $I_{f(eff)} = 0.86\text{A}$

تيار المجال المكافىء لرد فعل المنتج : $I_{f(A.R)} = I_{f(act)} - I_{f(eff)} = 0.99 - 0.86 = 0.13\text{A}$

عدد اللفات بالأمبير المناظرة : $N_f I_{f(A.R)} = 1200 \times 0.13 = 156\text{A}t / pole$

٢ - الآن $E_{a(eff)} = 88V$ عند السرعة ٨٠٠ لفة/دقيقة ، نحولها إلى السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة حتى نستنتج تيار المجال الفعلي المناظر لها : $E_{a(eff)} = \frac{88}{800} \times 1000 = 110V$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة

من جدول منحنى التمغنط ، تيار المجال الفعلي المناظر للجهد $E_{f(eff)} = 110V$ يساوي $I_{f(eff)} = 1.32\text{A}$

تيار المجال الفعلي في حالة التركيب القصير التراكمي : $I_{f(eff)} = I_{f(act)} + \frac{N_{sr}}{N_f} I_L - I_{f(A.R)}$

$I_L = I_a + I_{f(act)}$ ، N_{sr} عدد لفات ملفات التوالي ، N_f عدد لفات ملفات التوازي و يساوي ١٢٠٠

$$I_{f(eff)} = I_{f(act)} + \frac{N_{sr}}{N_f}\left(I_{a|F.L} + I_{f(act)}\right) - I_{f(A.R)}$$

$$1.32 = 0.99 + \frac{N_{sr}}{1200}(120 + 0.99) - 0.13$$

$$\frac{120.99\,N_{sr}}{1200} = 1.32 + 0.13 - 0.99 = 0.46$$

$$N_{sr} = \frac{1200 \times 0.46}{120.99} = 4.56$$ لفات/قطب

٣ - في حالة محرك مركب قصير تفاضلي و برد فعل المنتج :

تيار المجال الفعلي :
$$I_{f(eff)} = I_{f(act)} - \frac{N_{sr}}{N_f}\left(I_{a|F.L} + I_{f(act)}\right) - I_{f(A.R)}$$

$$= 0.99 - \frac{4.56}{1200}(120 + 0.99) - 0.13$$

$$= 0.4A$$

من جدول منحنى التمغنط عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة ، الجهد المناظر لتيار مجال 0.4 A يساوي : $E_a = 65V$ ، لكن $E_a = 88V$ عند الحمل الكامل (انظر الجزئين ١ و ٢) ، إذا كانت سرعة المحرك المركب القصير التفاضلي هي n :

$$65 = k\Phi \times 1000$$

$$88 = k\Phi n$$

أو $$n = 88 \times \frac{1000}{65} = 1353.9rpm$$

٥ - بدء حركة المحركات :

إذا تمّ توصيل محرك التيار المستمر مباشرة لمصدر قدرة مستمرة ، يمر تيار كبير جدا في ملفات عضو الاستنتاج يسمى بتيار بدء الحركة $I_{a|start}$ ، و في جميع الأحوال تزيد قيمة هذا التيار عن عشرة أمثال تيار الحمل الكامل $I_{a|F.L}$ ، قد يؤدي إلى تلف ملفات المنتج حتى و لو كان مروره لعدة لحظات فقط.

في محركات الاستثارة المنفصلة أو التوازي مثلا ، يعطى تيار المنتج بالعلاقة : $I_a = \dfrac{V_t - E_a}{R_a}$.

عند بدء التشغيل أو عند لحظة البدء ، يكون المحرك في حالة سكون أي السرعة صفر ، و على ذلك تكون القوة الدافعة الكهربائية المضادة $\left(E_a = k_a \cdot \Phi \cdot w_m\right)$ صفرا لحظيا .

لذا يعطى تيار بدء الحركة بالمعادلة التالية : $I_{a|start} = \dfrac{V_t}{R_a}$ ، مادامت مقاومة ملفات المنتج صغيرة ، تيار بدء الحركة يكون كبيرا جدا . للحد من قيمة هذا التيار و تخفيضه إلى قيمة آمنة لا تكون فيها خطورة على ملفات المنتج ، نستعمل إحدى الطريقتين :

١ - إضافة مقاومة خارجية ، R_{ae} على التوالي مع ملفات المنتج عند الإبتداء فيخفض تيار المنتج عند بدء الحركة إلى القيمة $I_{a|start} = \dfrac{V_t}{R_a + R_{ae}}$.

٢ - استخدام جهد تغذية $\left(V_t\right)$ منخفض عند بدء الحركة ، طبعا هذا يتطلب مصدر جهد متغير .

❖ لعزم بدء الحركة القيمة : $T_{m|start} = k_a \Phi I_{a|start}$ ، لكي يكون قويا يجب :

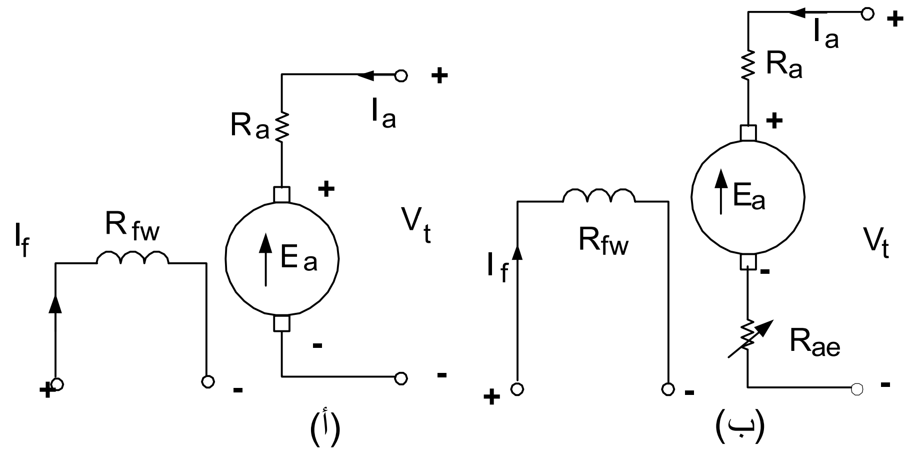
- $I_{a|start}$ يبقى أكبر من $I_{a|F.L}$ (١,٥ إلى ٢,٥ من $I_{a|F.L}$) عند استخدام منظم بدء الحركة .
- للتدفق Φ القيمة العظمى و ذلك بإعطاء مقاومة التحكم في المجال القيمة صفر $\left(R_{fc} = 0\right)$.

بدء الحركة يكون دائما بالقيمة العظمى للتدفق المغناطيسي .

❖ مع وجود المقاومة الإضافية R_{ae} في دائرة المنتج و عندما يتسارع المحرك تتولد الق.د.ك المضادة E_a و تزيد قيمتها عند ارتفاع السرعة فينخفض التيار I_a حسب المعادلة : $I_a = \dfrac{V_t - E_a}{R_a + R_{ae}}$

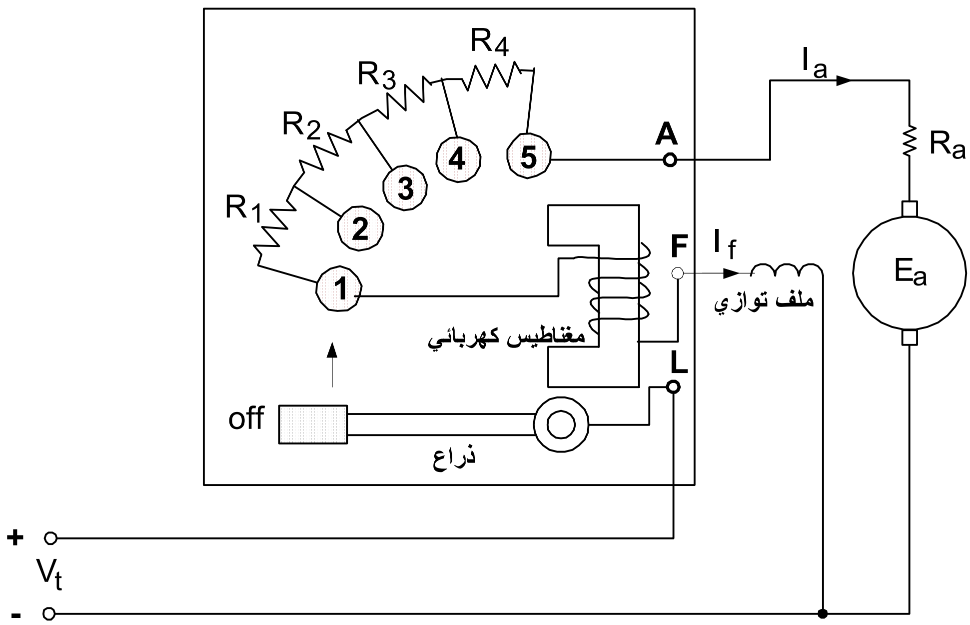
إذا انخفض تيار المنتج يهبط العزم أيضا ويقل تسارع المحرك ، لذا يجب إزاحة مقاومة بدء الحركة تدريجيا كلما زادت السرعة بدون أن يتعدى التيار حداً معيناً . يتحقق هذا باستخدام منظم بدء الحركة المبين في الشكل .

❖ منظم بدء الحركة :



الشكل ٨٥,١ : (أ) محرك استثارة منفصلة بدون مقاومة إضافية للمنتج

(ب) محرك استثارة منفصلة بمقاومة إضافية للمنتج



(ج)

الشكل ٨٥,١ (ج) تقسيم مقاومة بدء الحركة

منظم بدء الحركة (الشكل ٨٥,١ ج) هو عبارة عن مقاومات متصلة بالتوالي مع بعضها عن طريق نقط اتصال نحاسية يتحرك عليها ذراع يغير قيمتها و تصمم هذه المقاومات بحيث تكون كلها في طريق التيار المار في عضو الاستنتاج عند بدء الحركة ثم تقل كلما زادت سرعة المحرك إلى أن تصل هذه المقاومة

صفرا عند السرعة العالية حيث تبلغ القوة الدافعة الكهربائية المضادة المتولدة في أسلاك المنتج نهاية عظمى و بذلك تقوم مقام مقاومة بدء الحركة . يجب البحث عن التقسيم المناسب لمقاومة بدء الحركة الكلية بحيث نحافظ على قيمة التيار ما بين قيمة عظمى $I_{a|\max}$ و قيمة دنيا $I_{a|\min}$.

عند بدء الحركة ، يحرك الذراع إلى الموضع ١ ، كل المقاومات ، R_1 ، R_2 ، R_3 و R_4 تظهر على التوالي مع المنتج و بالتالي تحد من تيار بدء الحركة . عندما يأخذ المحرك في السرعة ، يحرك الذراع إلى المواضع ٢ ، ٣ ، ٤ ، و في النهاية ٥ . في الموضع ٥ يتمّ إزاحة كل مقاومات منظم بدء الحركة من دائرة المنتج . يثبت الذراع في الموضع ٥ بواسطة المغناطيس الكهربائي ، الذي يستثار بتيار المجال I_f .

* سؤال محلول :

محرك تيار مستمر توازي (10 Kw ، 100 V) يغذى من 100 V مصدر جهد مستمر . مقاومة ملفات المنتج تساوي 0.1 Ω .

١- أوجد تيار المنتج $I_{a|start}$ عند بدء الحركة بدون مقاومة إضافية إلى دائرة المنتج عند الإبتداء .

٢ - أوجد قيمة مقاومة بدء الحركة (R_{ae}) إذا ما تمّ حد تيار المنتج عند بدء الحركة إلى ضعفي تيار الحمل الكامل .

٣ - يشغل هذا المحرك باستخدام منظم بدء الحركة . احسب قيم المقاومات التي يتطلبها منظم بدء الحركة بحيث يكون تيار المنتج محصورا مابين ١٠٠ إلى 200% من قيمته عند الحمل الكامل عند الابتداء .

الحل :

١ - بدون مقاومة بدء الحركة متصلة مع المنتج $(R_{ae}=0)$ يساوي تيار بدء الحركة :

$$I_{a|start}=\frac{V_t}{R_a}=\frac{100}{0.1}=1000\text{A}$$

تيار المنتج عند الحمل الكامل : $I_{a|F.L}=\frac{P_{a|F.L}}{V_t}=\frac{10000}{100}=100\text{A}$

إذا $I_{a|start}=10\,I_{a|F.L}$

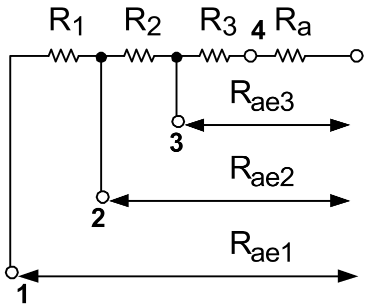
٢ - قيمة مقاومة بدء الحركة R_{ae} التي تعطي $I_{a|start}=2\,I_{a|F.L}=2\times 100=200\text{A}$:

$$I_{a|start}=\frac{V_t}{R_a+R_{ae}}$$

$$200=\frac{100}{0.1+R_{ae}}$$

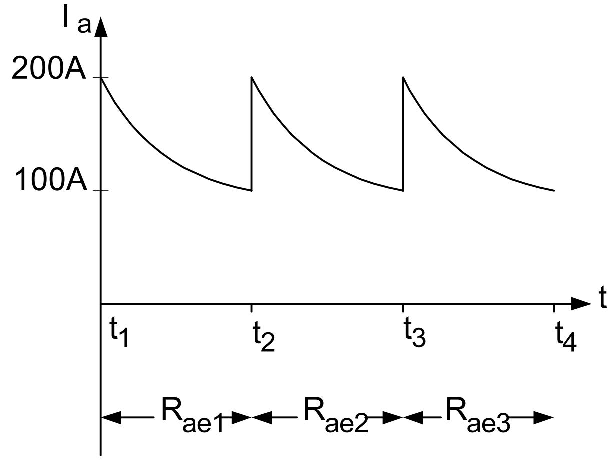
$$R_{ae}=0.4\Omega$$

٣ - ترتيب لمقاومات منظم بدء الحركة مبين في الشكل حيث R_{ae1} ، R_{ae2} ، R_{ae3} تمثل مقاومات منظم بدء الحركة في المواضع ١ ، ٢ ، ٣ على التوالي .



الشكل ٨٦,١ : تقسيم مقاومة بدء الحركة

يحرك الذراع إلى موضع جديد كلما انخفض تيار المنتج إلى 100 A ، قيمته عند الحمل الكامل . تغير تيار المنتج I_a مع الزمن مبين في الشكل .



الشكل٨٧,١ : تغير تيار المنتج مع الزمن عند بدء الحركة

من الجزء ٢ ، المقاومة الكلية لمنظم بدء الحركة عند الموضع ١ ، $R_{ae1} = 0.4\Omega$.

السرعة لاتتغير لحظيا و بالتالي الق.د.ك$(E_a = k_a \Phi w_m)$ لاتتغير لحظيا أي قيمتها قبل تحرك الذراع عند اللحظة t^- هي نفسها بعد لحظة تحركه t^+ ، ($E_a^- = E_a^+$)

لأي سرعة : $V_t = E_a + I_a(R_a + R_{ae})$ ، الجهد V_t ثابت ، E_a تزيد مع السرعة ، $(R_a + R_{ae})$ تنخفض مع ارتفاع السرعة .

- عند اللحظة $t = t_2^-$ (أي قبل تحرك الذراع إلى الموضع ٢) :

$I_a = 100\text{A}$ ، $E^-_{a2} = ?$ ، $R_{ae1} = 0.4\Omega$

$$E^-_{a2} = V_t - I_a(R_a + R_{ae1}) = 100 - 100(0.1 + .4) = 50V$$

- عند اللحظة $t = t^+_2$ (أي بعد ما انتقل الذراع إلى الموضع ٢) :

$I_a = 200\text{A}$ ، $E^+_{a2} = 50V$ ، $R_{ae2} = ?$

$$I_a = \frac{V_t - E^+_{a2}}{R_a + R_{ae2}} \quad \text{أو} \quad 200 = \frac{100 - 50}{0.1 + R_{ae2}} \quad \text{لذا} \quad R_{ae2} = 0.15\Omega$$

- عند اللحظة $t = t^-_3$ (أي قبل تحرك الذراع إلى الموضع ٣) :

$I_a = 100\text{A}$ ، $E^-_{a3} = ?$ ، $R_{ae2} = 0.15\Omega$

$$E^-_{a3} = V_t - I_a(R_a + R_{ae2}) = 100 - 100(0.1 + 0.15) = 75V$$

- عند اللحظة $t = t^+_3$ (أي بعد ما انتقل الذراع إلى الموضع ٣) :

$I_a = 200\text{A}$ ، $E^+_{a3} = 75V$ ، $R_{ae3} = ?$

$$I_a = \frac{V_t - E^+_{a3}}{R_a + R_{ae3}} \quad \text{أو} \quad 200 = \frac{100 - 75}{0.1 + R_{ae3}} \quad \text{لذا} \quad R_{ae3} = 0.025\Omega$$

- عند اللحظة $t = t^-_4$ (أي قبل تحرك الذراع إلى الموضع ٤) :

$I_a = 100\text{A}$ ، $E^-_{a4} = ?$ ، $R_{ae3} = 0.025\Omega$

$$E^-_{a4} = V_t - I_a(R_a + R_{ae3}) = 100 - 100(0.1 + 0.025) = 87.5V$$

- عند اللحظة $t = t^+_4$ (أي بعد ما انتقل الذراع إلى الموضع ٤) :

$I_a = 200\text{A}$ ، $E^+_{a4} = 87.5V$ ، $R_{ae4} = ?$

$$I_a = \frac{V_t - E^+_{a4}}{R_a + R_{ae4}} \quad \text{أو} \quad 200 = \frac{100 - 87.5}{0.1 + R_{ae4}} \quad \text{لذا} \quad R_{ae4} = -0.0375\Omega$$

القيمة السالبة للمقاومة R_{ae4} تدل على أنها غير مطلوبة أي $R_{ae4} = 0$. عند اللحظة $t = t^+_4$ (أي بعد ما انتقل الذراع إلى الموضع ٤) ، تيار المنتج و بدون مقاومة إضافية لا يتعدى 200 A . بالفعل فإن قيمة تيار المنتج I_a بعدما انتقل الذراع إلى الموضع ٤ عند اللحظة $t = t_4$ يساوي : $I_a = \frac{100 - 87.5}{0.1} = 125\text{A}$.

و في الأخير ، المقاومات التي يتطلبها منظم بدء الحركة هي :

$$R_1 = R_{ae1} - R_{ae2} = 0.4 - 0.15 = 0.25\Omega$$
$$R_2 = R_{ae2} - R_{ae3} = 0.15 - 0.025 = 0.125\Omega$$
$$R_3 = R_{ae3} - R_{ae4} = 0.025 - 0 = 0.025\Omega$$

مجموع هذه المقاومات لازم أن يساوي مقاومة بدء الحركة الكلية $R_{ae} = 0.4\Omega$:

$$R_1 + R_2 + R_3 = 0.25 + 0.125 + 0.025 = 0.4\Omega$$

٥,١ مسائل إضافية

١,٥,١ - الدوائر المغناطيسية

١,١,٥,١ - لملف ٤٠٠ لفة ملفوفة على حلقة دائرية ، لقلبها الحديدي مساحة مقطع دائرية $2\times10^{-3}m^{2}$ وقطرها المتوسط 5.1 cm .

١ - أوجد قيمة التيار الذي يمر في الملف اللازمة لتوليد شدة مجال مغناطيسي $H=110A\cdot t/m$

٢ - إذا كان مقدار التدفق المغناطيسي 4x10^{-4} Wb ، أوجد النفاذيتين μ ، μ_r إذا كانت النفاذية المطلقة تساوي $\mu_0=4\pi X10^{-7}\ H/m$.

الحل : (١) $I=0.044A$ ، (٢) $\mu=1.81\times10^{-3}H/m$ ، $\mu_r=1440$

٢ - دائرة مغناطيسية مكونة من قلب حديدي مستطيل الشكل ، طول مساره المتوسطي يساوي 40 cm و مساحة مقطعه $12cm^{2}$ ملفوف عليه ملف عدد لفاته ٤٠٠ . النفاذية النسبية للحديد تساوي ٤٠٠٠ والنفاذية المطلقة للفراغ $\mu_0=4\pi X10^{-7}\ H/m$.

١ - احسب :

١,١ - المقاومة المغناطيسة للقلب الحديدي ، R_c

٢,١ - شدة التيار اللازم I_1 لتوليد تدفق مغناطيسي كثافته 0.5 T

2- إذا أحدثت ثغرة هوائية في القلب الحديدي طولها 0.05 cm و بافتراض عدم تقوس خطوط المجال فيها ، احسب :

١,٢ - المقاومة المغناطيسية الكلية في الحديد و في الهواء R_{mtotal}

٢,٢ - الشدة الجديدة I_2 للتيار اللازم لتوليد نفس كثافة التدفق المغناطيسي في الحديد .

الحل : (١,١) $R_{c1}=66300A\cdot t/Wb$ ، (١,٢) $I_1=0.1A$ ، (٢,١) $R_{m|tot}=R_g+R_{c2}=382232A\cdot t/Wb$

(٢,٢) $I_2=0.6A$

مولدات التيار المستمر

-١ لآلتين ١ و ٢ من آلات التيار المستمر الخصائص الاسمية التالية :

- الآلة ١ : 120 V ، 1500 لفة/دقيقة ، 4 أقطاب
- الآلة ٢ : 240 V ، 1500 لفة/دقيقة ، 4 أقطاب

الملفات المتوفرة للف الآلتين لها الخصائص الاسمية عند 4 V و 5 A ، إ ذا كان لازما أن يستعمل نفس عدد الملفات (C) للف الآلتين ، أوجد :

-١ نوع لف ملفات المنتج لكل آلة

-٢ عدد الملفات المطلوبة لكل آلة

-٣ قدرة المنتج الاسمية لكل آلة

الحل : (١) آلة ١ : لف انطباقي ، آلة ٢ : لف تموجي

(٢) عدد ملفات الآلة ١ : ١٢٠ ، عدد ملفات الآلة ٢ : ١٢٠

(٣)قدرة المنتج الاسمية لآلة ١ : 2.4 Kw ، قدرة المنتج الاسمية لآلة ٢ : 2.4 Kw

-٢ مولد تيار مستمر من نوع استثارة منفصلة (12 Kw , 100 V , 1000 r.p.m) ، مقاومة ملفات منتجه تساوي 0.1Ω و عدد لفاته ١٢٠٠ لكل قطب ، مقاومة ملفات مجاله 80Ω . تيار المجال الاسمي $I_{f|rated} = 1A$. يدور هذا المولد عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة بتيار المجال الاسمي . منحنى التمغنط لهذا المولد عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يعطى في الجدول التالي :

$I_f(A)$	0	0.2	0.4	0.6	0.83	0.86	0.94	1.2	1.32	1.4
$E_a(V)$	8.5	31.4	65	77.1	93.5	94.4	98	108.5	110	112

-١إذا أهملنا رد فعل المنتج ، أوجد الجهد على الأطراف الخارجية للمولد V_t عند الحمل الكامل.

-٢ باعتبار رد فعل المنتج الآن مكافئاً إلى تيار مجال $I_{f(A.R)} = 0.06A$ ، أوجد :

-٢,١ جهد الأطراف الخارجية للمولد عند الحمل الكامل V_t

-٢,٢ تيار المجال الحقيقي $I_{f(act)}$ المطلوب لجعل جهد الأطراف $V_t = 100V$

الحل : (١) 88 V ، (٢,١) 86 V ، (٢,٢) 1.46 A

-٣ لمولد تيار مستمر ذي استثارة منفصلة (6 Kw ، 120 A ، 1200 لفة/دقيقة) مقاومة لفات المنتج 0.2 Ω ، مقاومة ملفات المجال 100 Ω و مقاومة التحكم في المجال R_{fc} التي تتغير قيمتها ما بين 0 و 150Ω . تغذى ملفات المجال من مصدر جهد مستمر مستقل 120 V .

خاصية اللاحمل عند السرعة 1200 لفة/دقيقة لهذا المولد تعطى في الجدول الموالي :

$I_f(A)$	0.00	٠,١	0.٢	0.٣	0.٤	٠,٤٨	٠,٦	٠,٩	١,٠	١,٢
$E_a(V)$	5.0	٢٠	٤٠	٦٠	٧٩	٨٩,٣	١٠٢	١١٧	١٢٠	١٢٥

-1 أوجد القيمتين العظمى و الدنيا $E_{a\max}$ و $E_{a\min}$ لجهد أطراف هذا المولد عند اللاحمل .

-2 تضبط مقاومة التحكم في المجال(R_{fc}) حتى يعطي المولد جهد 120V عند اللاحمل ، احسب :

-2.1 قيمة R_{fc}

-2.2 جهد أطراف المولد عند الحمل الكامل (التيار الاسمي الذي يمر في المنتج) وذلك في الحالتين :

-2.2.1 بدون رد فعل المنتج

-2.2.2 عند رد فعل المنتج مكافىء لتيار مجال $I_{f(A.R)} = 0.1A$

الحل : (١) $E_{a|max}=125V$ ، $E_{a|min}=89.3V$. (٢،١) $R_{fc}=20\Omega$
(٢،٢،١) $V_t=110V$ (٢،٢،٢) $V_t=97V$

٤- عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر توازي ملفوف لفا انطباقيا ، يعطي تيار 101.8 A ، له 720 موصل ويدور بسرعة 1000 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار فيضه 0.02 Wb.

مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.12 Ω و مقاومة ملفات المجال 126.5 Ω . إذا كانت المفاقيد الحديدية والميكانيكية تساوي 877 W و مع إهمال رد فعل المنتج ، احسب ما يلي :

1- القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة

2- الجهد على الأطراف الخارجية للمولد

3- تيار المجال

4- تيار الحمل

5- القدة التي يعطيها المولد للخرج (قدرة خرج المولد)

6- الفقد النحاسي

7- الكفاءة

الحل : (١) $E_a=240V$ ، (٢) $V_t=227.8V$ ، (٣) $I_f=1.8A$ ، (٤) $I_L=100A$
(٥) $P_2=22780V$ ، (٦) $P_{cu}=1654W$ ، (٧) $\eta\%=90\%$

٥- مولد تيار مستمر توازي ملفوف لفا انطباقيا و بدون ملفات تعويض ، مقاومة ملفات المنتج 0.3 Ω ومقاومة ملفات المجال 300 Ω .

عند التحميل يعطي المولد تيار 105 A للحمل الكامل عند جهد على أطرافه الخارجية يساوي 450 V .
للمنتج 690 موصل فعّال و يدور بسرعة ١٨٠٠ لفة/دقيقة في تدفق مغناطيسي 0.025 Wb لكل قطب .

١- أوجد القوة الدافعة الكهربائية عند اللاحمل

أوجد المقادير التالية عند الحمل الكامل :

٢- القدرة التي يعطيها المولد للحمل الكامل

3- تيار الإستثارة

٤- تيار المنتج

٥- القوة الدافعة الكهربائية

٦- الهبوط في الجهد المكافىء لرد فعل المنتج

الحل : (١) $E_{a,0} = 517V$ ، (٢) $P_2 = 47.25Kw$ ، (٣) $I_f = 1.5A$
(٤) $I_a = 106.5A$ ، (٥) $E_{a|F.L} = 482V$ ، (٦) $E_{a|A.R} = 35V$

-٦ لمولد تيار مستمر توازي (10 Kw ، 250 V ، 1000 rpm) ، مقاومة ملفات المنتج 0.2 Ω و مقاومة ملفات المجال Ω 133 . نفترض أن $E_{a,0} = V_{t|rated}$ عند اللاحمل . منحنى التمغنط لهذا المولد عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة يعطى في الجدول الآتي :

$I_f(A)$	٠	٠,١	0.٢	0.٣	0.٤	٠,٥	٠,٧٥	١,٠	١,٥	٢,٠
$E_a(V)$	١٠	٤٠	٨٠	١٢٠	١٥٠	١٧٠	٢٠٠	٢٢٠	٢٤٥	٢٦٣

-1 ارسم خاصية اللاحمل $E_a = f(I_f)$ عند السرعة ١٠٠٠ لفة/دقيقة من الجدول السابق

-٢ عين قيمة الجهد المتولد في المنتج بدون تيار مجال

-٣ أوجد القيمة العظمى للجهد المتولد $E_{a|max}$

-٤ احسب مقاومة التحكم في المجال (R_{fc}) اللازمة لتوليد جهد الأطراف الاسمي ($V_{t|F.L} = 250V$)

-٥ أوجد قيمة مقاومة دائرة المجال الحرجة $R_{f(critical)}$ و مقاومة التحكم الحرجة المناظرة لها $R_{fc(critical)}$

الحل : (٢) $E_{a,0} = 10V$ ، (٣) $E_{a|max} = 262V$ ، (٤) $R_{fc} = 23.25\Omega$ ،
(٥) $R_{f(crit)} = 400\Omega$ ، $R_{fc(crit)} = 267\Omega$

-٧ عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر من نوع التركيب الطويل ملفوف لفا انطباقيا له ٧٨٦ موصل و يعطي تيار 194.9 A عندما يدور بسرعة 900 لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار تدفقه 0.02 Wb ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.05 Ω ، مقاومة ملفات التوازي 55 Ω و مقاومة ملفات التوالي 0.03 Ω . إذا كانت المفاقيد الحديدية و الميكانيكية تساوي 3200 W و مع إهمال رد فعل المنتج احسب عند هذا الحمل :

-1 الق.د.ك المتولدة في المنتج

-2 الجهد على الأطراف الخارجية للمولد

-3 تيار مجال ملف التوازي

-4 تيار الحمل

-5 قدرة الخرج التي يعطيها المولد لهذا الحمل

-6 المفاقيد الكلية

-7 كفاءة هذا المولد

الحل : (١) $E_a = 235.6V$ ، (٢) $V_t = 220V$ ، (٣) $I_f = 4A$ ، (٤) $I_L = 190.4A$
(٥) $P_2 = 42Kw$ ، (٦) $\sum P_{losses} = 7.12Kw$ ، (٧) $\eta\% = 85.5\%$

٨- عضو الاستنتاج لمولد تيار مستمر من نوع التركيب القصير ملفوف لفا تموجيا له ١٢٠٠ موصل و يعطي تيار 60 A عندما يدور بسرعة ٦٠٠ لفة/دقيقة في مجال مغناطيسي مقدار تدفقه 0.021 Wb ، مقاومة ملفات عضو الاستنتاج 0.06 Ω ، مقاومة ملفات التوازي 250 Ω و مقاومة ملفات التوالي 0.04 Ω . إذا كانت المفاقيد الحديدية و الميكانيكية تساوي 4.5 Kw و مع إهمال رد فعل المنتج احسب عند هذا الحمل :

1- الق.د.ك المتولدة في المنتج
2- تيار مجال ملف التوازي
3- تيار الحمل
4- الجهد على الأطراف الخارجية للمولد
5- قدرة الخرج التي يعطيها المولد لهذا الحمل
6- المفاقيد الكلية
7- كفاءة هذا المولد

الحل : (١) $E_a = 1008V$ ، (٢) $I_f = 4.02A$ ، (٣) $I_L = 55.98A$ ، (٤) $V_t = 1002.16V$
(٥) $P_2 = 56.1Kw$ ، (٦) $\sum P_{losses} = 8875W$ ، (٧) $\eta\% = 86.3\%$

٩- لمولد تيار مستمر مركب قصير من النوع التراكمي (12 Kw ، 100 V ، 1000 لفة/دقيقة) مقاومات ملفات المنتج ، ملف مجال التوازي و ملف مجال التوالي 0.1 Ω ، 80 Ω ، 0.01 Ω على الترتيب . لملف مجال التوازي 1200 لفة لكل قطب . نتائج خاصية التمغنط لهذا المولد عند السرعة 1000 لفة /دقيقة تعطى في الجدول التالي :

$I_f(A)$	0.00	0.2	0.4	0.6	0.8	1.00	1.2	1.4	1.45	1.5
$E_a(V)$	6	35	60	80	90	100	105	110	113.2	120

أحسب عدد لفات ملف مجال التوالي لكل قطب N_{sr} اللازمة لجعل جهد أطراف المولد يساوي 100 V عند اللاحمل و عند الحمل الكامل . مع العلم أن قيمة مقاومة التحكم في مجال التوازي $R_{fc} = 20\Omega$ ورد فعل المنتج مكافىء لتيار مجال $I_{f|A.R} = 0.06A$

الحل : $N_{sr} = 5.04 turns/pole$

محركات التيار المستمر

-١٠ محرك تيار مستمر توازي (440 V) ، له مقاومة المنتج 0.25 Ω و يدور بسرعة ٧٥٠ لفة/دقيقة عندما يأخذ المنتج تيار قدره 60 A ، احسب :

-١ القوة الدافعة الكهربائية المضادة

-٢ عزم المحرك الكلي

الحل: (١) $E_a = 425V$ ، (٢) $T_m = 324.7N.m$

-١١ محرك تيار مستمر ، ملفوف لفا انطباقيا ، يحتوي منتجه على ٥٧٦ موصل فعال، يسحب تيار 10 A ويدور في تدفق مغناطيسي مقداره 0.02 Wb لكل قطب ، احسب عزم هذا المحرك .

الحل : $T_m = 18.3N.m$

-١٢ محرك تيار مستمر توازي ملفوف لفا تموجيا ، يسحب تيار خط 60 A من مصدر جهد مستمر قدره 550 V عند الحمل الكامل . مقاومة ملفات عضو الاستنتاج تساوي 0.5 Ω و عدد موصلاته الفعالة ١٠٠٠ ، مقاومة ملفات المجال 220 Ω . يدور المنتج في تدفق مغناطيسي 0.032 Wb لكل قطب .

-١ احسب عند الحمل الكامل

-١,١ تيار الاستثارة

-١,٢ تيار المنتج

-١,٣ القوة الدافعة الكهربائية المضادة

-١,٤ سرعة المحرك

-١,٥ عزم المحرك

-٢ تمّ الآن توصيل مقاومة خارجية مع ملفات المجال مقدارها 55 Ω فانخفض العزم إلى 60% من قيمته عند الحمل الكامل ، احسب لهذه الحالة الجديدة :

-٢,١ تيار الإستثارة

-٢,٢ تيار المنتج

-٢,٣ القوة الدافعة الكهربائية المضادة

-٢,٤ سرعة المحرك

الحل : (١,١) $I_{f1} = 2.5A$ ، (١,٢) $I_{a1} = 57.5A$ ، (١,٣) $E_{a1} = 521.25V$ ، (١,٤) $n_1 = 488.6rpm$ ،
(١,٥) $T_{m1} = 585.7N.m$ ، (٢,١) $I_{f2} = 2A$ ، (٢,٢) $I_{a2} = 35.9A$ ، (٢,٣) $E_{a2} = 532.5V$ ،
(٢,٤) $n_2 = 624.4rpm$

13- محرك تيار مستمر من نوع التوازي يغذي حملا ميكانيكيا قدرته 111.9 Kw عند الحمل الكامل و يدور بسرعة ٩٦٠ لفة/دقيقة عندما يوصل على منبع جهد مستمر مقداره 550 V ، الكفاءة 91% ، مقاومة ملفات المنتج تساوي 0.1 Ω و مقاومة ملفات المجال 275 Ω ، أوجد :

١- القدرة التي يسحبها المحرك من المنبع

٢- تيار المجال ، تيارالذي يسحبه المحرك من المنبع ، تيار المنتج

٣- المفاقيد الميكانيكية و الحديدية

٤- عزم المحرك على عمود الإدارة و العزم الكهرومغناطيسي

ألحل : (١) $P_1 = 122967W$ ، (٢) $I_f = 2A$ ، $I_L = 223.6A$ ، $I_a = 221.6A$

(٣) $P_{mech} + P_{iron} = 5056W$ ، (٤) $T_2 = 1113N.m$ ، $T_m = 1163.3N.m$

14- محرك تيار مستمر من النوع التوالي ملفوف لفا تموجيا و موصل على مصدر جهد مستمر مقداره 220V يسحب هذا المحرك تيار 52 A من هذا المصدر عند الحمل الكامل . مقاومة ملفات المنتج 0.2 Ω و ملفات المجال 0.1Ω . إذا كان عدد المجاري ١٣٠ و تحتوي على ٦ موصلات و التدفق المغناطيسي 0.018 Wb لكل قطب .

١- احسب عند الحمل الكامل :

- ١,١ القوة الدافعة المغناطيسية المضادة

١,٢- سرعة المحرك

١,٣- عزم المحرك الكلي

٢- إذا انخفض العزم الآن إلى 60% من قيمته عند الحمل الكامل ، أوجد لهذه الحالة الجديدة :

٢,١- التيار الذي يسحبه المحرك الآن من المصدر

٢,٢- القوة الدافعة المغناطيسية المضادة

٢,٣- سرعة المحرك

الحل : (١,١) $E_a = 204.4V$ ، (١,٢) $n_1 = 540.8rpm$ ، (١,٣) $T_{m1} = 187.7N.m$

(٢,١) $I_{a2} = 40.3A$ ، (٢,٢) $E_a = 207.9V$ ، (٢,٣) $n_2 = 709.7rpm$

15- محرك تيار مستمر من نوع استثارة توالي موصل ميكانيكيا لمروحة ، يسحب تيار شدّته 54 A ويدور بسرعة مقدارها ٥٠٠ لفة/دقيقة عندما يغذى من مصدر جهد مستمر قدره 230 V و بدون مقاومة إضافية لملفات المنتج $(R_{ae} = 0)$. العزم الذي تتطلبه المروحة متناسب مع السرعة تربيع . مقاومة ملفات

المنتج تساوي Ω 0.15 و مقاومة ملفات مجال التوالي Ω 0.05 . يمكن إهمال رد فعل المنتج و المفاقيد الميكانيكية و الحديدية .

١- أوجد القوة الدافعة الكهربائية المضادة المتولدة في ملفات المنتج

٢- أوجد القدرة الميكانيكية التي يعطيها المحرك للمروحة

٣- احسب العزم الذي يولده المحرك على عمود الإدارة

٤- تخفض السرعة الآن إلى ٣٠٠ لفة/دقيقة بإضافة مقاومة إلى دائرة المنتج . أوجد لهذه السرعة الجديدة

٤.١- عزم المحرك على عمود الإدارة

٤.٢- القدرة الميكانيكية التي يعطيها المحرك الآن للمروحة

٤.٣- مقدار المقاومة إلى أضيفت إلى ملفات المنتج (R_{ae}) .

الحل : (١) $E_a = 219.2V$ ، (٢) $P_{2|500} = 11836.8W$ ، (٣) $T_{500} = 226N.m$

(٤.١) $T_{300} = 81.36N.m$ ، (٤.٢) $P_{2|300} = 2556W$ ، (٤.٣) $R_{ae} = 4.46\Omega$

١٦- محرك تيار مستمر توالي يدور بسرعة ١٢٠٠ لفة/دقيقة و يسحب تيار 40 A عندما يوصل إلى منبع جهد مستمر مقداره 230 V . مقاومة ملفات المنتج تساوي Ω 0.25 و مقاومة ملفات مجال التوالي Ω 0.1 . إذا إفترضنا أن التدفق المغناطيسي متناسب مع تيار المجال (علاقة خطية) ، أوجد :

١- القوة الدافعة الكهربائية المضادة

٢- القدرة الميكانيكية الكلية التي يولدها المحرك

٣- العزم الكهرومغناطيسي الذي يولده المحرك

٤- انخفض الحمل على المحرك فأصبح الآن يسحب تيار 20 A، أعد حساب الأجزاء السابقة (١، ٢ ، ٣

ألحل : (١) $E_{a|40} = 216V$ ، (٢) $P_{m|40} = 8640W$ ، (٣) $T_{m|40} = 68.75N.m$

(٤.١) $E_{a|20} = 223V$ ، (٤.٢) $P_{m|20} = 4460W$ ، (٤.٣) $T_{m|20} = 17.19N.m$

١٧- محرك تيار مستمر توازي (87.5 Kw ، 250 V) يغذى من مصدر جهد مستمر 250 V . مقاومة ملفات المنتج تساوي Ω 0.05 .

١- أوجد تيار المنتج $I_{a|start}$ عند بدء الحركة بدون مقاومة إضافية $(R_{ae} = 0)$ إلى دائرة المنتج عند الإبتداء . -٢ أوجد قيمة مقاومة بدء الحركة (R_{ae}) إذا ما تمّ حد تيار المنتج عند بدء الحركة إلى ضعفي تيار الحمل الكامل .

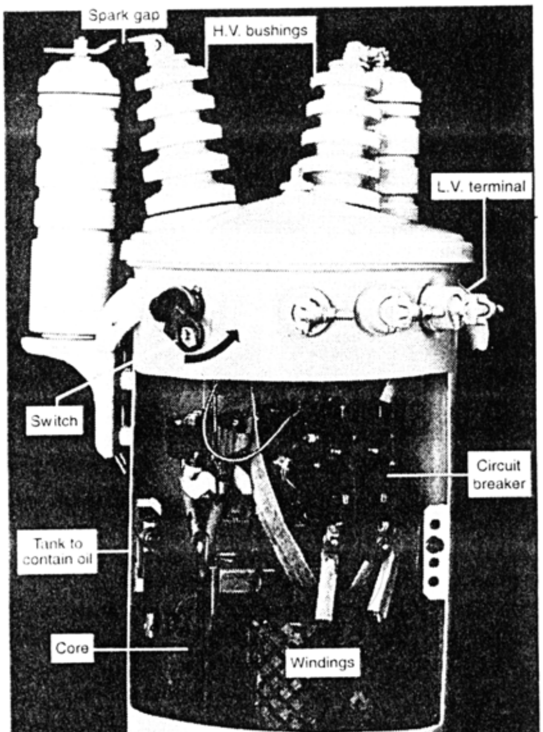
٣- يشغّل هذا المحرك باستخدام منظم بدء الحركة . احسب قيم المقاومات التي يتطلبها منظم بدء الحركة بحيث يكون تيار المنتج محصورا مابين ١٠٠ إلى 200% من قيمته عند الحمل الكامل عند الابتداء.

الحل : (١) $I_{a|start} = 5000A$ ، (٢) $R_{ae} = 0.307\Omega$ ، (٣) $R_1 = 0.1785\Omega$ ، $R_2 = 0.0893\Omega$ ، $R_3 = 0.0392\Omega$

٢- ١ المحوّلات
TRANSFORMERS

مقدمة :

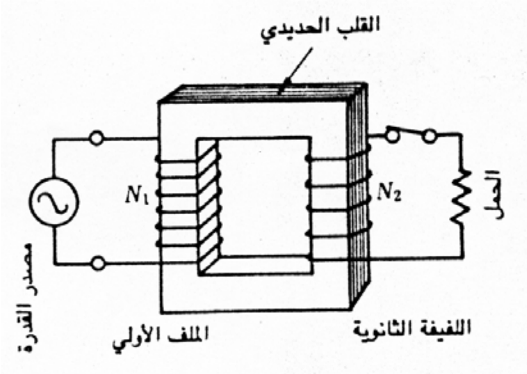
المحوّلات الكهربائية أجهزه ثابتة (غير دوارة) تستطيع رفع أو خفض الجهد و التيار المتردد بواسطة الحث الكهرومغناطيسي. وهذا يسمح بنقل القدرة بكفاءة ، وبالتالي فإن المحوّلات هي المعدة الأساسية التي لا يمكن الاستغناء عنها لنقل القدرة وتوزيعها.
وفى هذا الفصل سيتم استعراض التركيب ، الدائرة المكافئة ، الخصائص و التوصيلات للمحوّلات .



شكل ٢ -١: محوّل توزيع وجه واحد

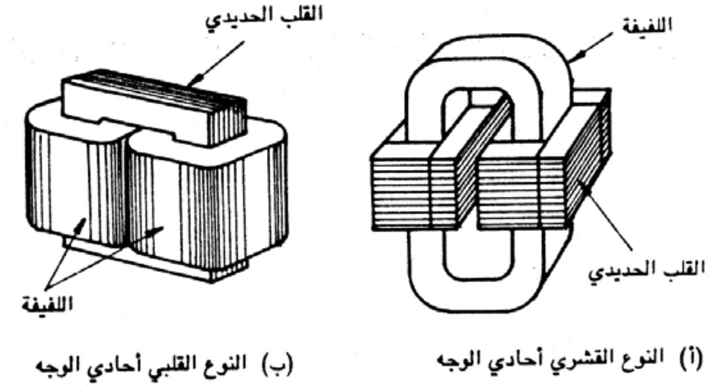
٢ - ١ تركيب المحوّلات TRANSFORMER CONSTRUCTION

يستخدم المحول لتغير الجهد باستخدام الحث المتبادل ويحوي الملف الابتدائي والملف الثانوي لسريان التيار وقلباً حديدياً لتيسير تدفق الفيض المغناطيسي . يتكون المحول من الملفات الابتدائية والملفات الثانوية ويصنع من قلب تلف حوله ملفات كما هو موضح في شكل (٢ -٢).



شكل ٢ - ٢ دائرة تركيب المحول

وعند لف أسلاك حول القلب ، فإنه من حيث التركيب يوجد نوعان : النوع القلبي ، والنوع القشري المبينان في الشكل (٢ -٣) أ ، ب.



شكل (٢ - ٣) أنواع المحوّلات تبعاً لطريقة تركيب لفات الأسلاك

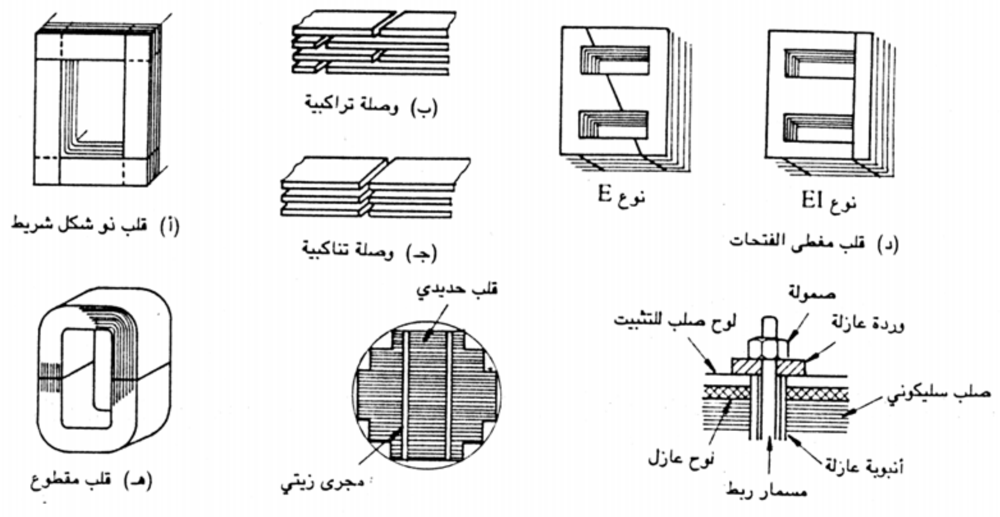
في حالة النوع القلبي تفصل اللفائف إلى اثنين ، فيكون العزل أسهل ؛ و بالتالي فإن النوع القلبي مناسب للجهد العالي و السعة الكبيرة ، والنوع القشري يستخدم للجهد المنخفض ، مثل المحولات الصغيرة .

ففي صناعة القلب ترصّ مجموعة من صفائح الصلب السليكوني و التي تحتوى على ٣٪ من السيليكون و٩٧٪ من الصلب. و تتميز بخصائص مغناطيسية ممتازة وفقد حديدي منخفض .

٢ -١ -١ القلب CORE

لعمل قلب المحول تستخدم مادة ذات كثافة فيض مغناطيسي عالية و معامل نفاذية مغناطيسي عالٍ و فقد حديدي صغير. والمادة المستخدمة على نطاق واسع هي من طبقة G العازلة ، وهي صفائح الصلب السليكوني التي تحتوى على نسبة ٣,٥ ٪ من السيليكون لخفض فقد التخلف المغناطيسي. وتلك المادة لها موجهيه حيث إن الفيض المغناطيسي يمكن أن يمر بسهولة في اتجاه واحد فقط ، كما أن الطلاء العازل المستخدم على سطح كل صفيحة من الصلب السليكوني يمنع سريان التيارات الدوّامية .

- معامل الفراغ : يغطى سطح صفيحة الصلب السليكوني بمادة عازلة ؛ و بالتالي فعند عمل القلب ذي الطبقات ترصّ صفائح الصلب السليكوني كما هو مبين في الشكل (٢ -٣) أ ، ب . المساحة المقطعية الفعالة للقلب لتمرير الفيض المغناطيسي تختلف عن المساحة المشغولة بالفعل . وتسمى النسبة بين تلك المساحتين بمعامل الفراغ ، وهي عادة حوالي ٩٦٪.
- تركيب القلب : بالنسبة لقلوب المحوّلات العادية ، فإن صفائح الصلب السيلكوني المشكّلة على هيئة شرائط ترصّ لتشكل قلباً ذا طبقات ، ويجمع القلب كما هو مبين في الشكل (٢ -٤) أ . ولتوصيل القلب تستخدم وصلة تناكبية أو وصلة تراكبية كما هو مبين في الشكل (٢ -٤) ب ، ج .



شكل(٢ -٤) القلوب الحديدي

يستعمل القلب مسدود الفتاحات للمحولات الصغيرة المستخدمة في معدات الاتصال ، وغالبا ما تثقب ألواح الصلب كما هو مبين في الشكل (٢ -٤) د . و القلب ذو اللفائف هو النوع ذو الموجهية من نوع شريط الصلب السيلكوني غير الملحوم ، وهو مبين في الشكل (د). وبالمقارنة بالقلب ذي الشكل الشريطي

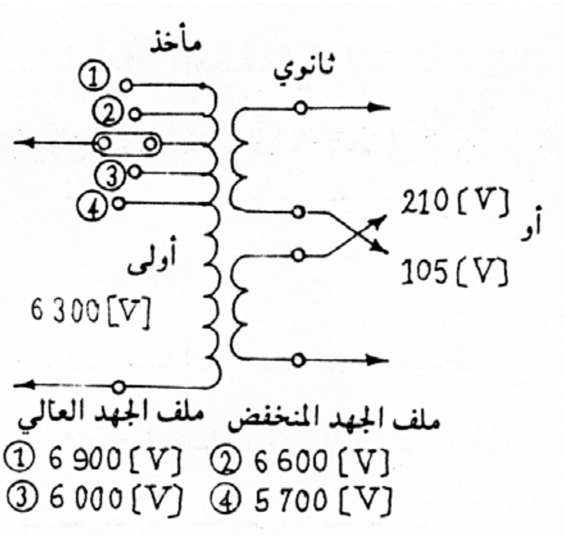
فإن تيار الإثارة وفقد الحديد يمكن أن يكون أصغر ، و يمكن أن يكون القلب أقل وزنا . ويستخدم هذا النوع أساساً للمحولات الصغيرة .

و الشكل (هـ) هو مثال للقلب ذي اللفائف ، وفي هذه الحالة فإن كل القلب يلصق براتنج مخلق ويقطع عند مكانين ، وتغمر اللفائف ثم يوصل الاثنان كجسم موحد بوصلة تناكبية باستخدام الضغط وهذا ما يعرف بالقلب المقطوع .

ويسخن المحول بسبب فقد الحديد وفقد النحاس ، لذلك فإنه يغمر الجسم الرئيسي للمحول في الزيت لأغراض التبريد في أحيان كثيرة. وفي حالة المحوّلات ذات الحجم الكبير يزود القلب أحيانا بمجارٍ زيتية للسماح بحركة أسرع للزيت خلال القلب كما هو في شكل (و). ولأجل جعل القلب ذي الطبقات جسماً موحدا تثبت صفائح الصلب السيلكوني بصفائح ماسكة ومسامير ربط ، ولكن تعزل المسامير كهربائيا لمنع سريان التيارات الدوّامية خلال مسامير التثبيت أو الصفائح الماسكة . كما أن عدد المسامير المستخدم يقل بلصق صفائح الصلب السيلكوني باستخدام مادة لاصقة.

٢ -١ -٢ **اللفائف** Windings

كما هو مبين في الشكل (٢ -٥) ، عادة ما تستخدم لفائف جهد عالٍ ولفائف جهد منخفض . ولعمل تلك اللفائف فإن أسلاك النحاس اللدنة تستخدم كمادة موصلة ، وتستخدم الأسلاك المستديرة والأسلاك المستطيلة تبعاً لشكل المحوّل .

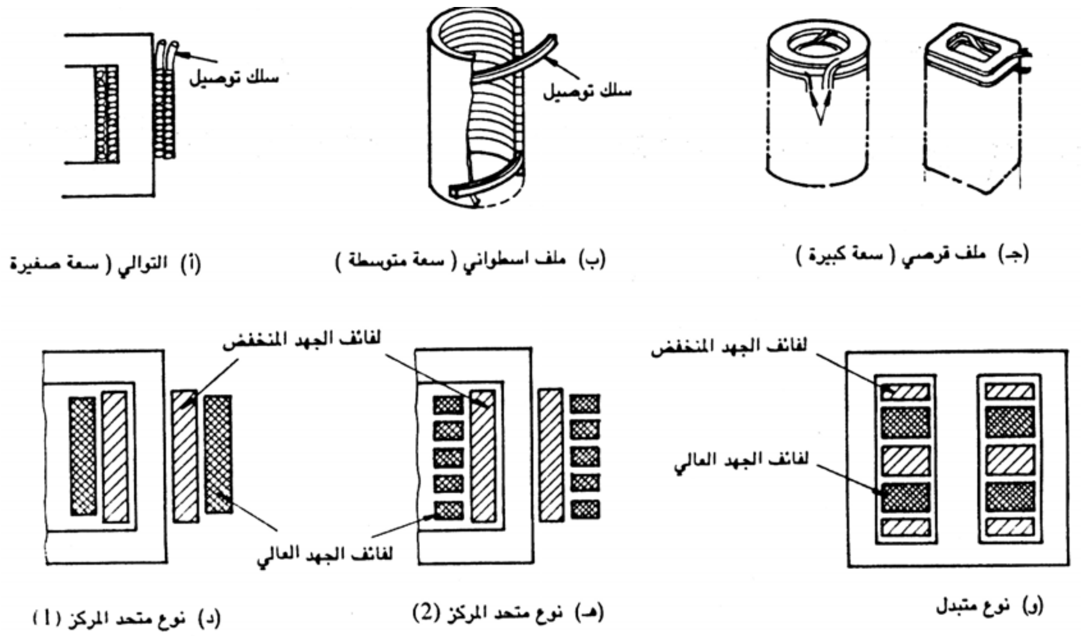


شكل (٢ -٥) مثال لمحوّل (النوع ذو القطب المركب)

وكطريقه لعمل اللفائف ، فإنه بعد تطبيق العزل على القلب تلف اللفائف مباشرة حول القلب بالنسبة للمحولات الصغيرة ولكن العمل ليس بالسهل في هذه الطريقة عندما تزداد السعة . ففي حالة المحولات

المتوسطة وكبيرة الحجم يتم عمل الملفات الأسطوانية أو الملفات القرصية أولا كما هو مبين في الشكل (٢ -٦) ب ، ج ثم يوضع القلب في الملفات .

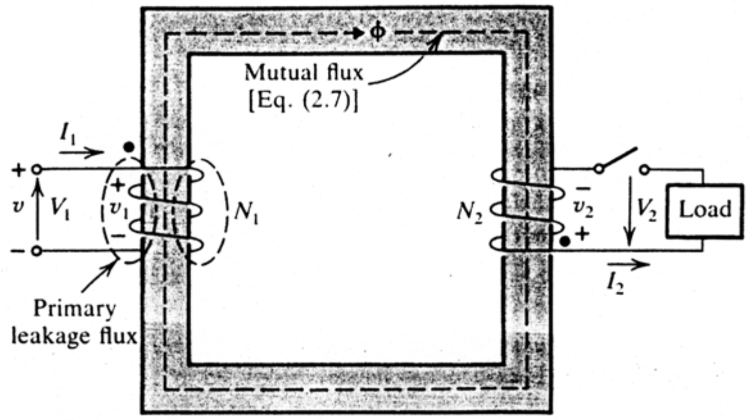
و عند ترتيب هذه الأنواع من اللفائف للقلوب ، يتم تقسيم اللفائف أو يتم وضع الجانب منخفض الجهد من اللفائف بجانب القلب كما هو مبين في الشكل (٢ -٦) د ، هـ ، و . وللعزل بين الملف الأولى و الملف الثانوي أو بين اللفائف والقلب تستخدم أسطوانة عازلة مصنوعة من ورق الكرافت الملفوف ومثبتة براتنج أفينول ، و ذلك للأنواع متحدة المحور كما في الشكل (٢ -٦) ج ، هـ أما للأنواع المترددة في الشكل (٢ -٦) د فأن ألواح الورق المضغوط المعاملة بالورنيش ترصّ في طبقات عديدة



شكل (٢ -٦) اللفائف وترتيبها

٢ - ٢ محوّلات الوجه الواحد **Single- Phase Transformers**

كما هو مبين بالشكل (٢ - ٧) ، المحوّل ذو الوجه الواحد عادة له لفائف دخل ولفائف خرج تعرف بالملفات الابتدائية والملفات الثانوية .



(٢ - ٧) المحوّل ذو الوجه الواحد

وهذه الملفات لا يوجد بينهما اتصال كهربائي ولكن يكون اتصالها مغناطيسيا . الملف الابتدائي يسحب الطاقة من جهد المصدر بينما ينقل الملف الثانوي الطاقة للحمل.

والمحولات تقوم بتحويل أو بتغيير الجهد أو التيار المسلط على الملفات الابتدائية من مستوى إلى آخر . والمحولات ليست مكبرات قدرة ولكن عند استخدامها لجميع الأغراض فإن القدرة الظاهرية S في الملفات الابتدائية تساوى القدرة الظاهرية المنقولة للحمل بواسطة الملفات الثانوية . أو بمعنى آخر أن حاصل ضرب الجهد والتيار في الملف الابتدائي يساوى حاصل ضرب الجهد والتيار في الملف الثانوي ، ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً كما يلي :

$$|S| = V_1 I_1 \approx V_2 I_2 \qquad (١ - ٢)$$

نظرية عمل المحوّل

فكرة عمل المحول ذي الوجه الواحد (وبقية المحولات) تعتمد على نظرية الحث المغناطيسي . وفقاً لقانون فراداي للحث فإنه عندما يمر فيض مغناطيسي في ملفات القلب الحديدي فإنه يتولد جهد (أو قوة دافعة كهربائية ق . د. ك.) في كل لفة من ملفات القلب ، ويتناسب هذا الجهد مع معدل تغير الفيض المغنطيسي بالنسبة للزمن. ويمكن الحصول على هذا الجهد من العلاقة التالية :

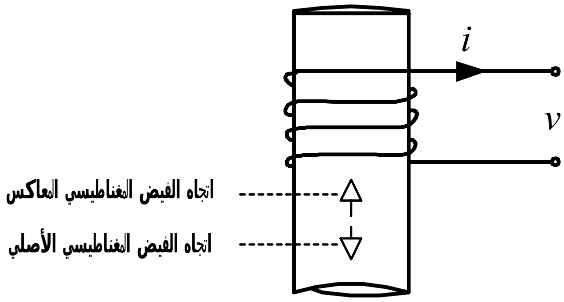
$$V = \frac{d\Phi}{dt} \qquad (١ - ٢)$$

حيث إن Φ تمثل الفيض المغنطيسي .

وإذا كان القلب له عدد لفات N لفة ويمر بها نفس الفيض المغنطيسي Φ فإن الجهد المتولد يكون :

$$V = N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (٣ - ٢)$$

ووفقا لقانون لينز فإن الجهد المستحث في موصل مقفل (أي أنه يتم توصيل نهايات الملف مع بعضها البعض) كما في الشكل ٢ -



شكل ٢ -٨ توضيح لقانون لينز

وهذا الجهد بدوره يولد تيارا والتيار بدوره يولد فيضاً مغناطيسياً معاكساً للفيض المسبب للتيار(الفيض الأصلي).

وبالتالي فإنه يمكن كتابة معادلة (٢ - ٣) كالتالي :

$$V = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (٢-٤)$$

وبذلك فأن قانون لينز مفيد جدا لتحديد القطبية للجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي .

ويمكن الحصول على العلاقة بين الجهد المتولد والفيض المولد له من المعادلة التالية :

$$V = 4.44 \quad f \quad N \quad \Phi_m \qquad (٢-٥)$$

حيث إن V هي القيمة الفعالة لجهد الدخل (rms) , f التردد بالهيرتز و Φ_m القيمة العظمي للفيض المغنطيسي .

وتعرف هذه المعادلة بمعادلة القوة الدافعة المغناطيسية أو معادلة المحول العامة .

بذلك فإن الجهد المتولد على أطراف الملف الثانوي للمحول يمكن الحصول عليه من المعادلة ٢ -٥ .

كما أنه يمكن إيجاد العلاقة بين الجهود و عدد لفات الملفات من المعادلة (٢ -٢)كالتالي :

$$v_1 = N_1\frac{d\Phi}{dt} \qquad (٢-٦)$$

$$v_2 = N_2\frac{d\Phi}{dt} \qquad (٢-٧)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (٢-٨)$$

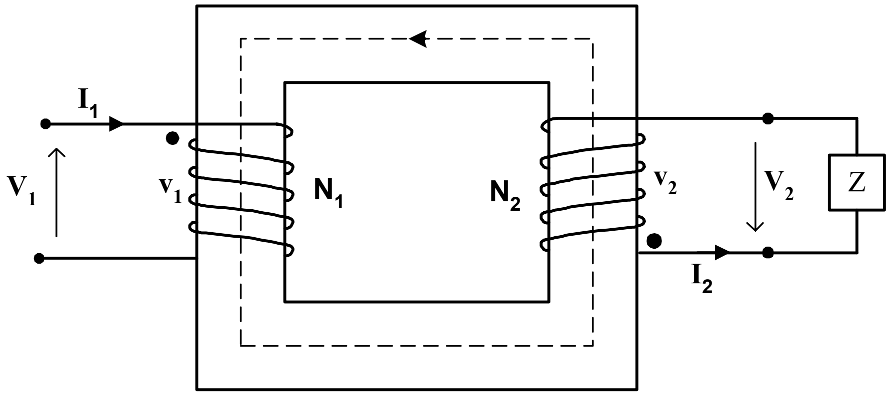
حيث إن a هي نسبة اللف أو نسبة التحويل.

ويمكن تمثيل المعادلة (٢ - ٨) بصيغة rms كالتالي :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (٢-٩)$$

٢ - ٤ المحول المثالي The Ideal Transformer

لمعرفة العلاقة بين الملفات الثانوية والابتدائية للمحول بصفة عملية ، فإننا سوف ندرس هذه العلاقة أولا بالنسبة للمحول المثالي.المحول المثالي تكون المفاقيد الحديدية به تساوي صفراً ، و مقاومة الملفات تساوي صفراً (مهملة) وليس به تسرب مغناطيسي . وبالنظر للشكل (٢ - ٩) فإنه يمكن إيجاد مكونات الدائرة على النحو التالي:



شكل (٢ - ٩) المحوّل المثالي

$$v_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (٢ - ١٠)$$

$$v_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (٢ - ١١)$$

من المعادلات (٢ - ١٠) و (٢ - ١١) فإنه يمكن إيجاد v_2 كما يلي :

$$v_2 = v_1 \frac{N_2}{N_1} \qquad (٢ - ١٢)$$

وبما أن المحول مثالي فإن

$$v_1 = V_1 \quad و \quad v_2 = V_2$$

و بذلك فإن :

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \qquad (٢ - ١٣)$$

كما إنه يمكن استنتاج أن

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2} \qquad (٢ - ١٤)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \qquad (٢ - ١٥)$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \qquad (٢ - ١٦)$$

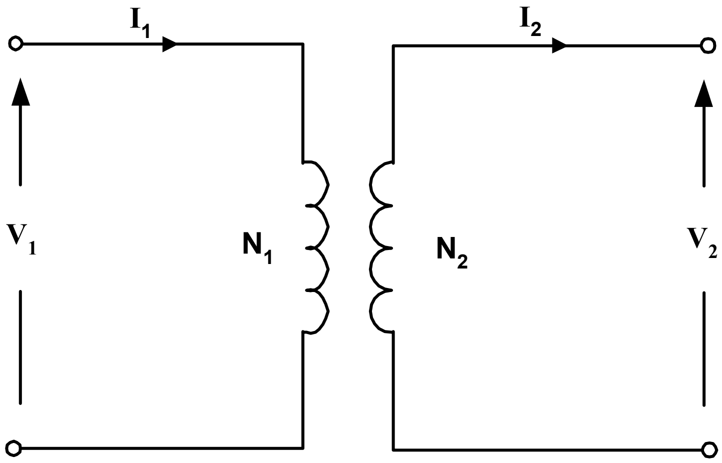
حيث إن Z_1 و Z_2 ليست معاوقة الملفات ولكنها المعاوقة التي ترى من جهة الملف الابتدائي و الثانوي على التوالي.

ومن المعادلات (٢ - ١٣) و (٢ - ١٤) يمكن الحصول على خاصية المعاوقة للمحول كالتالي :

$$Z_1 = Z_2\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \qquad (٢ - ١٧)$$

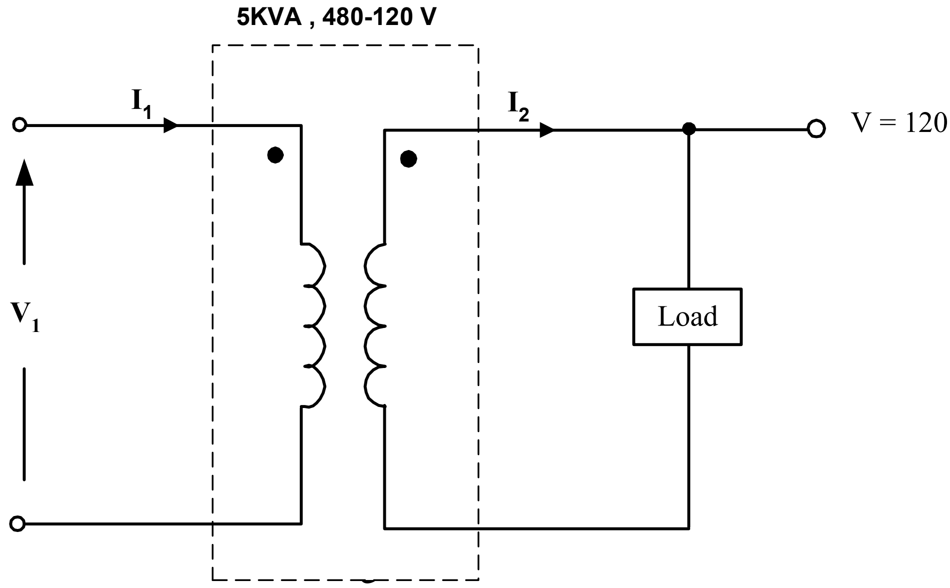
ملاحظة : المعادلات (٢ - ١٢) ، (٢ - ١٤) و (٢ - ١٧) تطبق فقط على المحول المثالي .

ويمكن تمثيل الدائرة المكافئة للمحول المثالي كما في شكل (٢ - ١٠) .



شكل (٢ - ١٠) الدائرة المكافئة للمحول المثالي

مثال ٢ - ١ :محول وجه واحد KVA-480-120 v٥ ، موضح بالشكل (٢ - ١١) ينقل تياراً اسمياً لحمل جهده ١٢٠ v . بإهمال المفاقيد احسب تيار المحوّل و الجهد المغذي له ؟



الحل:

أولا نحسب التيار عبر الملفات الثانوية (I_2)

$$I_2 = \frac{|S|}{V} = \frac{5000}{120} = 41.67A$$

ويمكن الحصول على نسبة اللف عن طريق نسبة الجهود كالتالي :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{480}{120} = 4$$

ويمكن الحصول على التيار في الملفات الابتدائية من المعادلة رقم ٢ - ١٤ كالتالي:

$$I_1 = \frac{1}{4}(41.67) = 10.42A$$

والجهد المغذى للمحول هو 480V.

مثال ٢ - ٢:

احسب عدد اللفات الابتدائية والثانوية لمحول 60Hz –240 /120V إذا كان الفيض المغنطيسي في القلب لا يزيد عن 6 m wb ؟

الحل:

من المعادلة ٢ - ٥ عدد اللفات في الملف الابتدائي هي:

$$N_1 = \frac{V_1}{4.44 f\Phi_m} = \frac{240V}{(4.44)(60Hz)(5\times10^{-3})} = 180 \text{ لفة}$$

و بنفس الطريقة يمكن إيجاد N_2

$$N_2 = \frac{V_2}{4.44 f\Phi_m} = \frac{120V}{(4.44)(60Hz)(5\times10^{-3})} = 90 \text{ لفة}$$

أو

$$N_2 = \frac{N_1}{a} = \frac{180}{2} = 90 \quad \text{لفة}$$

حيث إن

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{240}{120} = 2$$

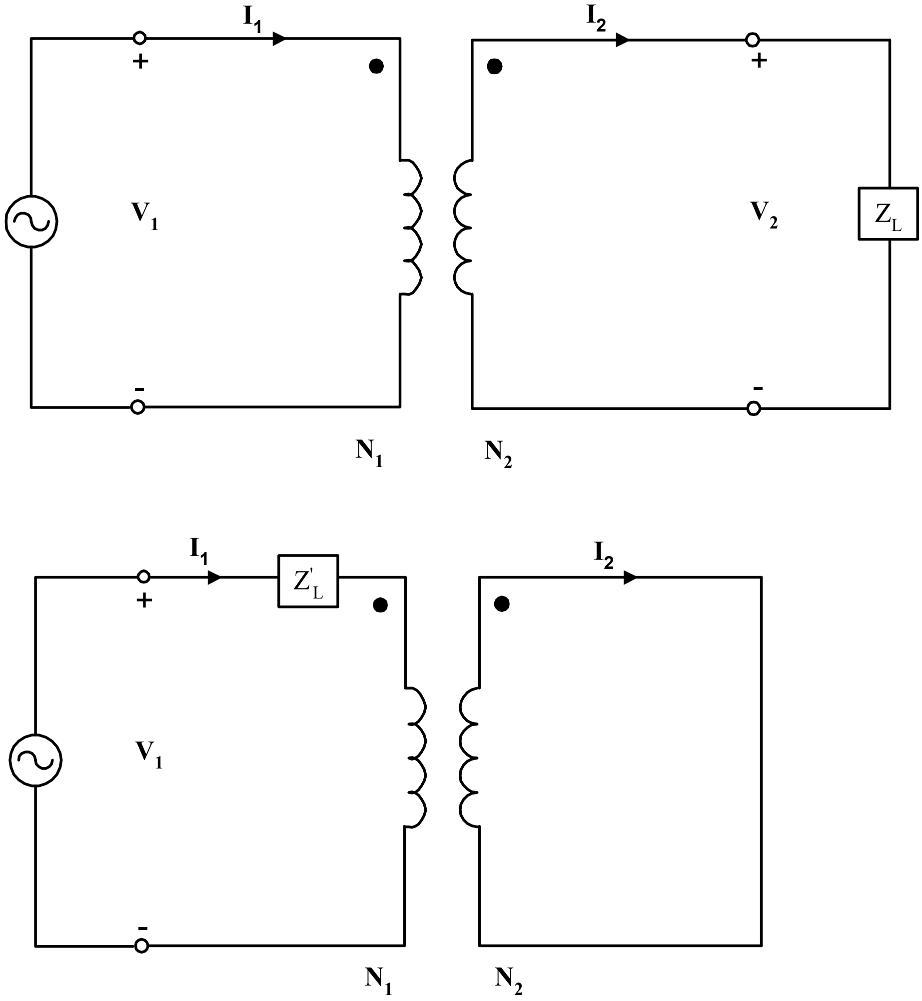
نقل المعاوقة في المحوّلات

نقل المعاوقة من الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي أو العكس مفيد في تبسيط الدائرة من دائرة كهربائية مزدوجة إلى دائرة مفردة وبالتالي تسهُل عملية الحسابات .

في الشكل (٢ -١٢) أ يمكن نقل معاوقة الحمل Z_L الموصلة على الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي .

(أ)

(ب)



شكل (٢ -١٢) نقل معاوقة الحمل Z_L

الموصلة على الجانب الثانوي إلى الجانب الابتدائي

بافتراض أن كل المتغيرات معطاة في نظام الوجهي (Phasors) ، إذا يمكن تعريف معاوقة الحمل Z_L كالتالي :

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} \qquad (١٨- ٢)$$

ومن الشكل ٢ -١٢ (ب) يمكن إيجاد المعاوقة في الجانب الابتدائي كالتالي :

$$Z'_L = \frac{V_1}{I_1} \qquad (١٩- ٢)$$

<u>حيث إن</u>

$$V_1 = aV_2 \qquad (٢٠- ٢)$$

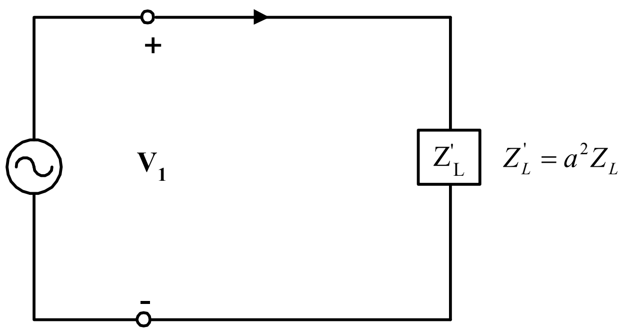
$$I_1 = \frac{I_2}{a} \qquad (٢ \ -١٢)$$

بتعويض المعادلتين (٢ -٢٠) و (٢ -٢١) في المعادلة (٢ -١٩) تكون المعادلة الظاهرية في الجانب الابتدائي هي :

$$Z'_L = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} \qquad (٢ \ -٢٢)$$

$$Z'_L = a^2 Z_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L \qquad (٢ \ -٢٣)$$

الشكل (٢ -١٣) يبين الدائرة المكافئة لهذه النتيجة .



شكل (٢ - ١٣) الدائرة المكافئة

وبنفس الطريقة يمكن نقل المعادلة من الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي كالتالي :

$$Z'_1 = \frac{Z_1}{a^2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 Z_1 \qquad (٢ \ -٢٤)$$

مثال ٢ -٣ :

محوّل توزيعي مثالي له البيانات التالية : **24000/240 v , 250 KVA , 60 Hz**

احسب ما يلي :

أ -نسبة التحويل (اللف) a .

ب - قيمة معاوقة الحمل المتصلة بالجانب الثانوي .

ج -قيمة التيار في الجانب الابتدائي I_1

د -قيمة معاوقة الحمل إذا نقلت إلى الجانب الابتدائي .

الحل

أ .

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2400}{240} = 10$$

ب . بما أن المحوّل مثالي فليس به مفاقيد إذاً :

$$S = V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{250000}{240} = 1041.67A$$

ج. التيار في الملف الابتدائي هو :

$$I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{1041.67}{10} = 104.167A$$

أو

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{250000}{2400} = 104.167A$$

د. قيمة معاوقة الحمل في الجانب الابتدائي يمكن حسابها كالتالي :

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{240V}{1041.67A} = 0.2304\Omega$$

$$Z_L' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L = a^2 Z_L = 10^2 \times 0.2304 = 23.04\Omega$$

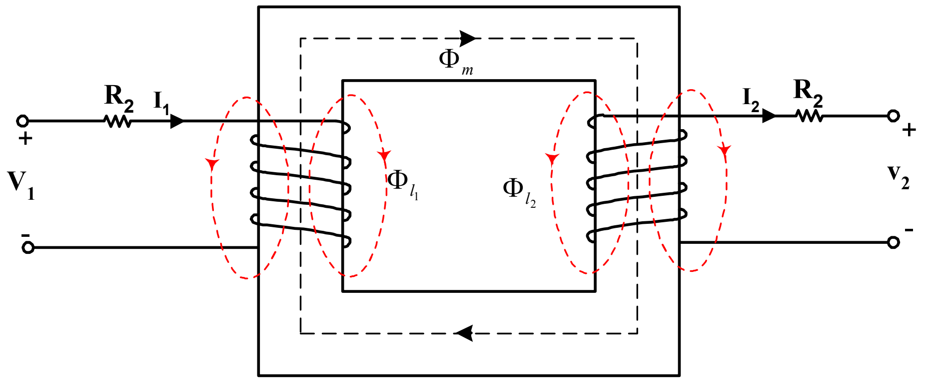
المحوّل الفعلي (غير المثالي) The Real Transformer

المحوّل الفعلي أو غير المثالي يختلف عن المحوّل المثالي في عدة أوجه . منها على سبيل المثال كما يبين الشكل (٢ -١٤)

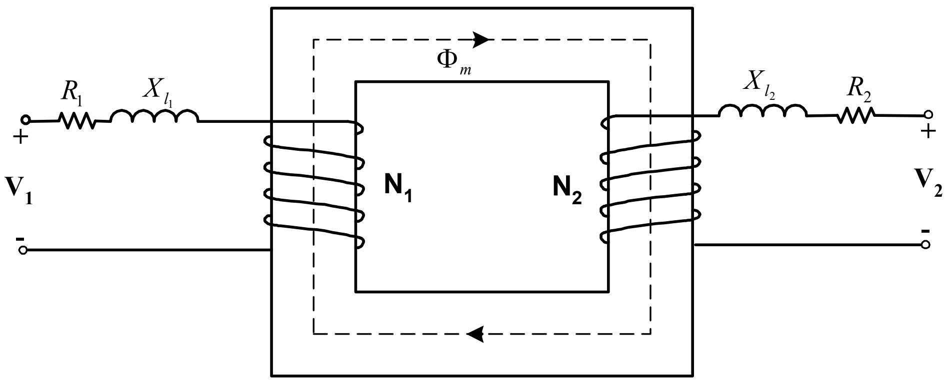
- مقاومة الملف الابتدائي والثانوي R_1 وR_2 ليست مهملة .
- وجود الفيض المغناطيسي المتسرب ϕ_{L_1} و ϕ_{L_2} في الملف الابتدائي والثانوي على التوالي .
- المفاقيد الحديدية غير مهملة .
- نفاذية مادة القلب ليست مالانهاية بما يؤدي إلى وجود فيض تبادلي ϕ_m في القلب .

ويوضح الشكل (٢ -١٤) ب تمثيل المحوّل الفعلي .

حيث إن X_{L_1} و X_{L2} هما مفاعلة الفيض المغناطيسي المتسرب في الملف الابتدائي والثانوي على التوالي .



(أ)



(ب)

شكل (٢ - ١٤) تمثيل المحوّل الفعلي

ومن الشكل (٢ -١٥) يتضح لنا أن التيار I_1 يساوي :

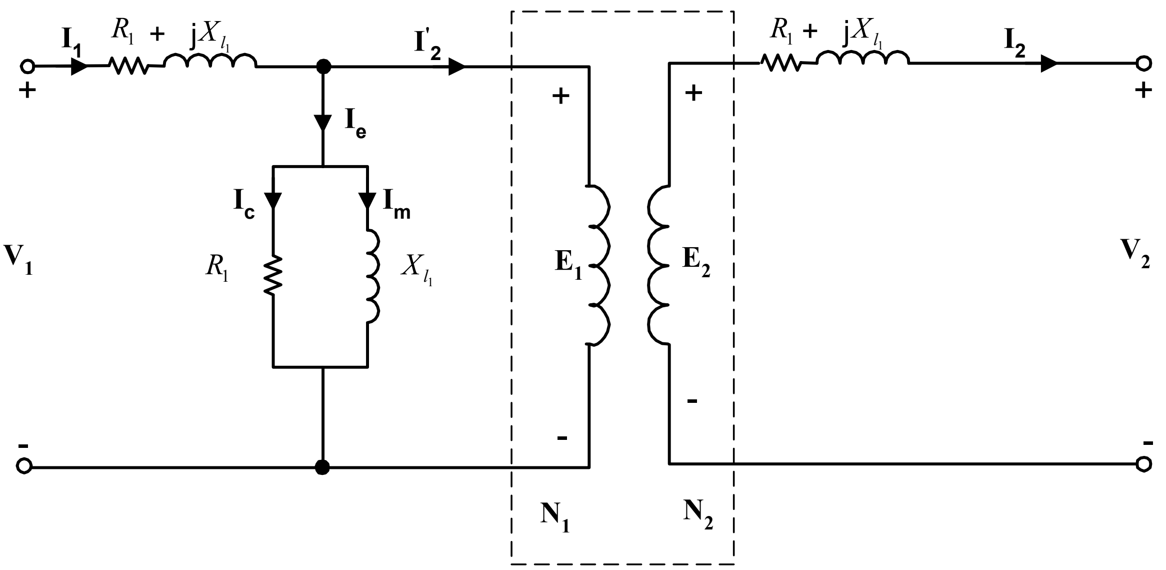
$$I_1 = I_2^{'} + I_e \qquad (٢ -٢٥)$$

حيث أن :

$$I_2^{'} = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{a} \qquad (٢ -٢٦)$$

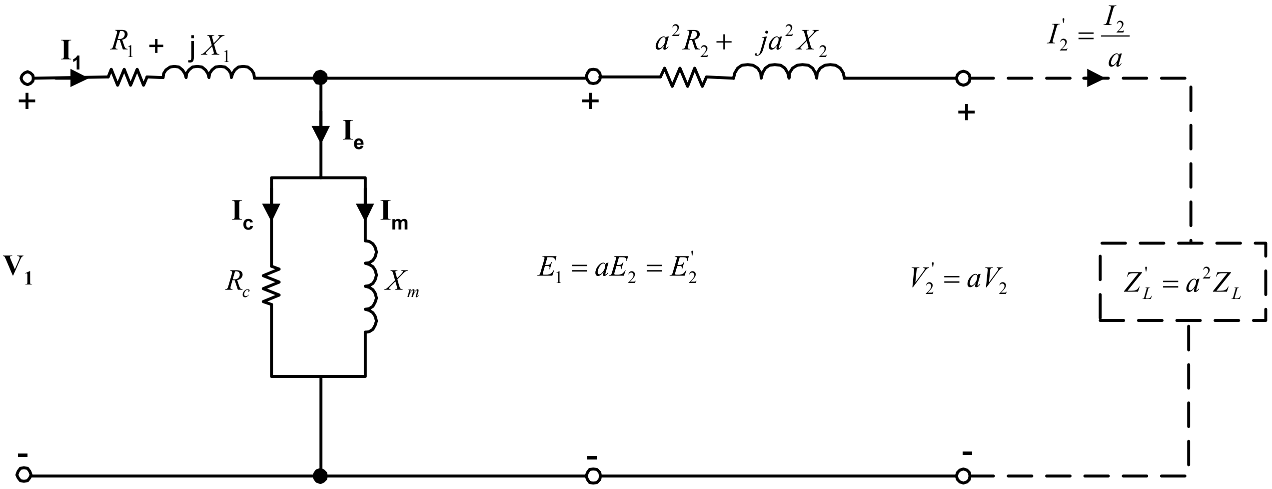
وهو عبارة عن تيار الملف الثانوي محوّل للملف الابتدائي.

و I_e هو تيار الاستثارة ويمكن فصله إلى مركبتين : الأولى هي I_C لها نفس وجه الجهد V_1 والثانية I_m لها نفس وجه الفيض المغناطيسي ϕ_m في القلب ويعرف التيار I_C بتيار فقد الحديد ، بينما يعرف التيار I_m بتيار المغناطيسية . وعند سريان التيارات I_C و I_m إلى دائرة الاستثارة فإن الشكل (٢ -١٥) يبين الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل وتعرف R_C بمواصلة الاستثارة (مقاومة مكافئة للمفاقيد الحديديه) و X_m بتقبلية الاستثارة (ممانعة التمغنط) .



شكل (٢ - ١٥) الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل

يمكن حذف المحوّل المثالي في الشكل (٢ -١٥) بتحويل مكوّنات الجانب الثانوي للجانب الابتدائي كما هو مبين في الشكل (٢ -١٦)



أ) شكل (٢ -١٦) الدائرة المكافئة لدائرة استثارة المحوّل بعد حذف المحوّل المثالي

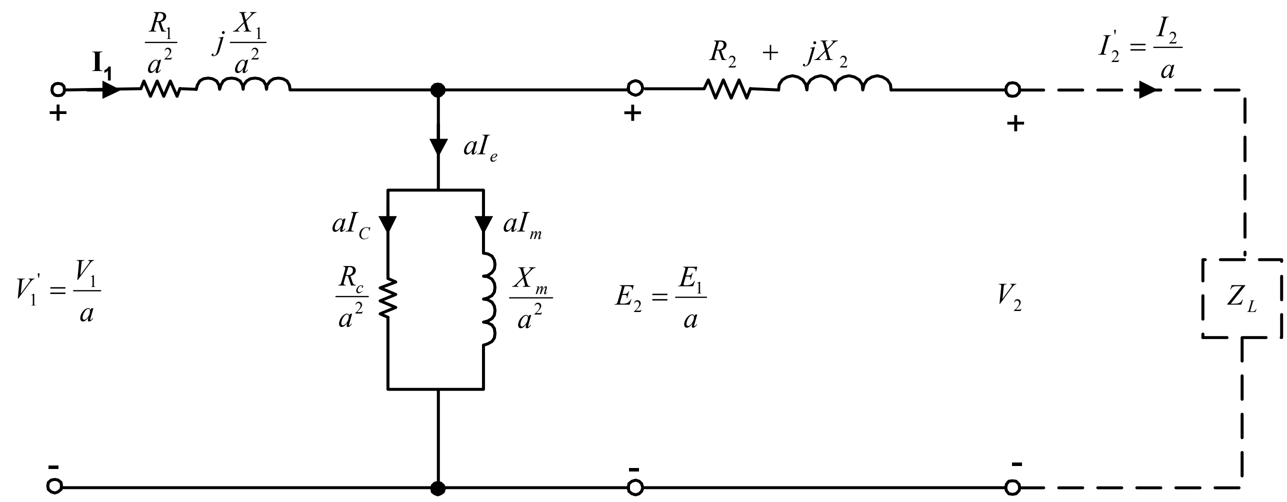
حيث إن : $V_2' = aV_2$ الجهد الثانوي محوّل للابتدائي

$E_2' = aE_2$ القوة الدافعة الكهربائية محوّله للابتدائي

$I_2' = \frac{I_2}{a}$ التيار الثانوي محوّل للابتدائي

$a^2R_2 + ja^2X_2$ المعاوقة الثانوية محوّلة للابتدائي

كما أنه يمكن حذف المحوّل المثالي أيضاً بتحويل مكوّنات الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي كما هو موضح بالشكل (٢ -١٧).



ب) شكل (٢ -١٧) تحويل مكوّنات الجانب الابتدائي إلى الجانب الثانوي

حيث أن :

$V_1' = \frac{V_1}{a}$ الجهد الابتدائي محوّل للثانوي

$\frac{R_1}{a^2} + j\frac{X_1}{a^2}$ المعاوقة الابتدائية محوّله للثانوي

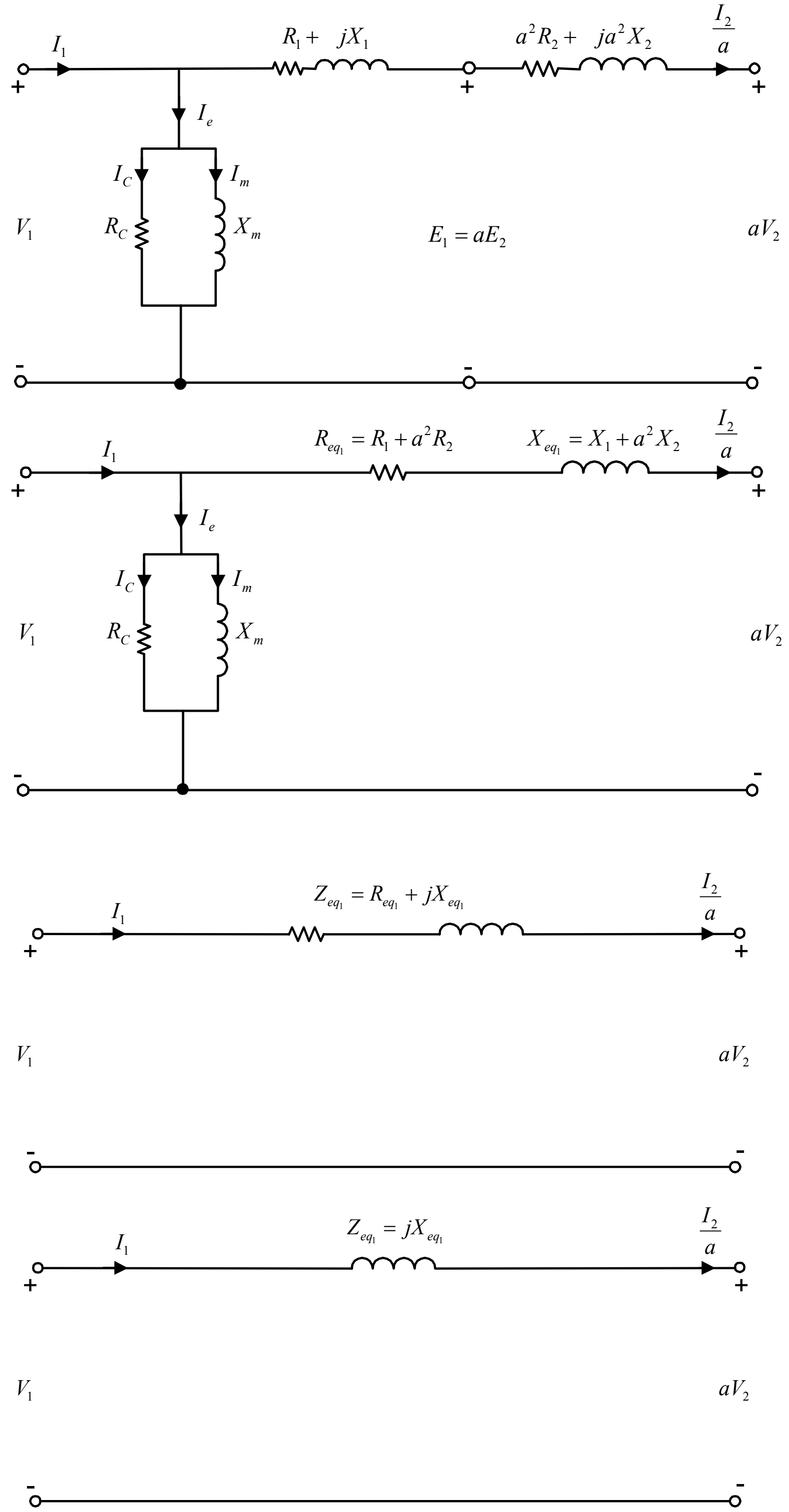
$I_1' = aI_1$ التيار الابتدائي محوّل للثانوي

$aI_e = aI_C + aI_m$ تيار الاستثارة محوّل للثانوي

٢ -٧ الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي (The Equivalent Circuit of A Real Transformer)

الدوائر المكافئة التي تم شرحها في الجزء السابق (الجزء ٢ -٦) في الشكل (٢ -١٦) و الشكل (٢ -١٧) دقيقة بنسبة كبيرة في الحياة العملية ، ولكن في تطبيقات القدرة الكهربائية فإن تيار الاستثارة I_e صغير جدا مقارنة مع تيار الحمل للمحوّل ؛ وبالتالي فإن الجهد المتولد عنه في الملفات الابتدائية $(R_1 + jX_1)$ جهد صغير. مما يمكننا من نقل الدائرة التي يمر بها التيار I_e على يسار أو يمين مكوّنات الدائرة كما يبين الشكل (٢ -١٨) أ مما يسهل جمع الممانعات والمقاومات كما في الشكل (٢ -١٨) ب .

(أ)
(ب)
(ج)
(د)



شكل (٢ - ١٨) الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي

في حالة ما تكون مقاومة الملف الثانوي منقولة للملف الابتدائي كما بالشكل (٢ -١٨) ب فإن :

$$Z_{eq_1} = R_{eq_1} + jX_{eq} \qquad (٢-٢٧)$$

$$R_{eq_1} = R_1 + a^2 R_2 \qquad (٢-٢٨)$$

$$X_{eq_1} = X_1 + a^2 X_2 \qquad (٢-٢٩)$$

وفي حالة ما تكون مقاومة الملف الابتدائي منقولة للملف الثانوي كما بالشكل (٢ -١٩) فإن :

$$Z_{eq_2} = R_{eq_2} + jX_{eq_2} \qquad (٢-٣٠)$$

$$R_{eq_2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2 \qquad (٢-٣١)$$

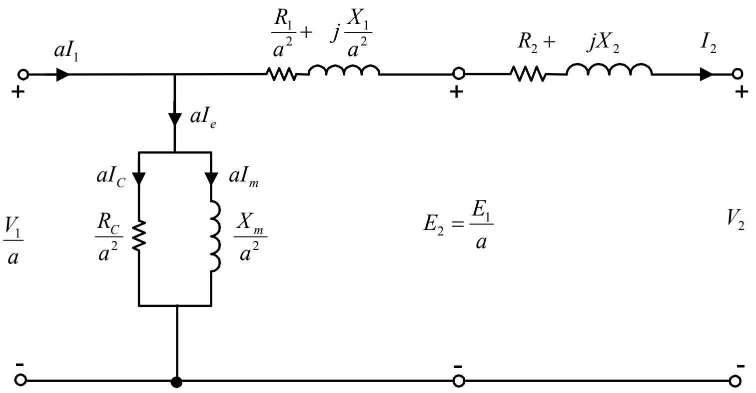
$$X_{eq_2} = \frac{X_1}{a^2} + X_2 \qquad (٢-٣٢)$$

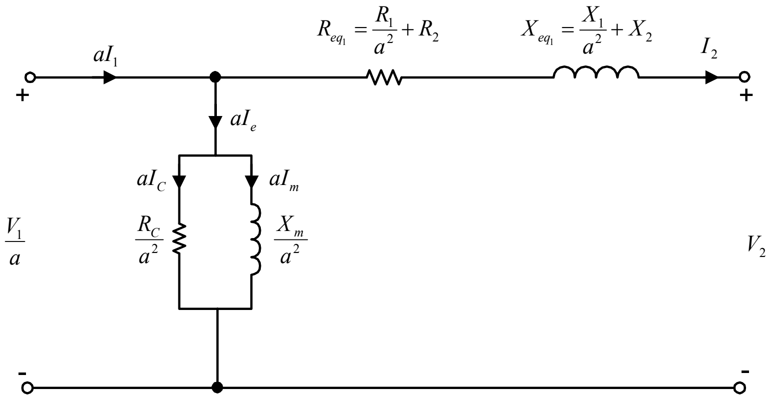
ويمكن أيضاً تبسيط الدائرة المكافئة للمحوّل الفعلي أيضا بحذف دائرة الاستثارة حيث إن التيار I_e صغير جداً كما يبين الشكل (٢ -١٨) ج وشكل (٢ -١٩) ج .

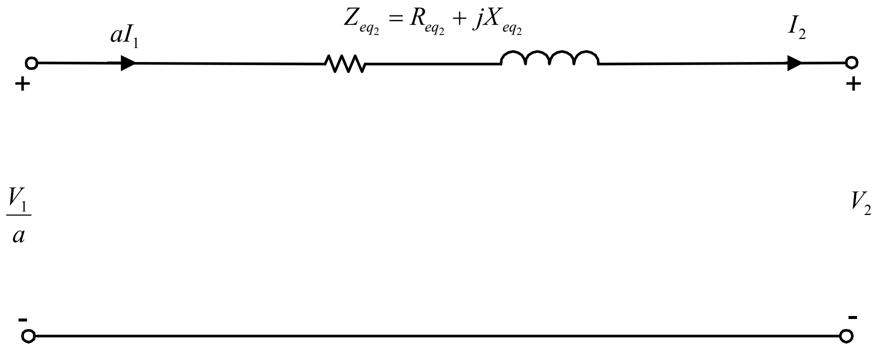
وفي محوّلات القدرة فإن المقاومة R_{eq} صغيرة جداً مقارنة بالمفاعلة X_{eq} وعلى ذلك فإن المحوّل قد يتم تمثيله بالمفاعلة X_{eq} فقط وإهمال R_{eq} كما يبين الشكل (٢ -١٨) د والشكل (٢ -١٩) د ومنها فإن المقاومة الكلية تكون :

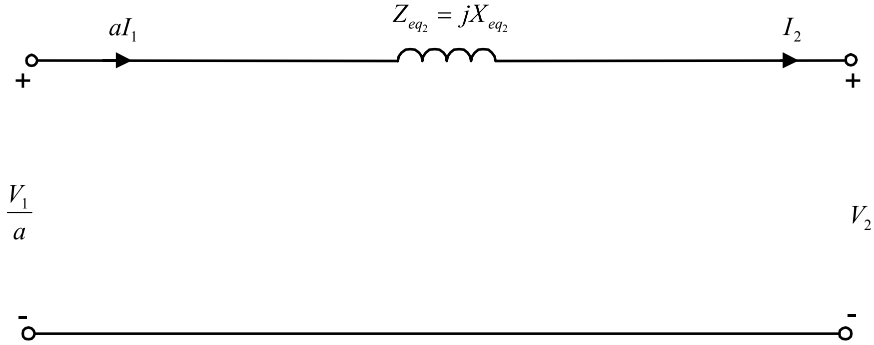
$$Z_{eq_1} = jX_{eq_1} \qquad (٢-٣٣)$$

$$Z_{eq_2} = jX_{eq_2} \qquad (٢-٣٤)$$


aI_1
$\frac{R_1}{a^2} + j\frac{X_1}{a^2}$
$R_2 + jX_2$
I_2
aI_e
aI_C
aI_m
$\frac{V_1}{a}$
$\frac{R_C}{a^2}$
$\frac{X_m}{a^2}$
$E_2 = \frac{E_1}{a}$
V_2


$R_{eq_1} = \frac{R_1}{a^2} + R_2$
$X_{eq_1} = \frac{X_1}{a^2} + X_2$
aI_1
I_2
aI_e
aI_C
aI_m
$\frac{V_1}{a}$
$\frac{R_C}{a^2}$
$\frac{X_m}{a^2}$
V_2


$Z_{eq_2} = R_{eq_2} + jX_{eq_2}$
aI_1
I_2
$\frac{V_1}{a}$
V_2


$Z_{eq_2} = jX_{eq_2}$
aI_1
I_2
$\frac{V_1}{a}$
V_2

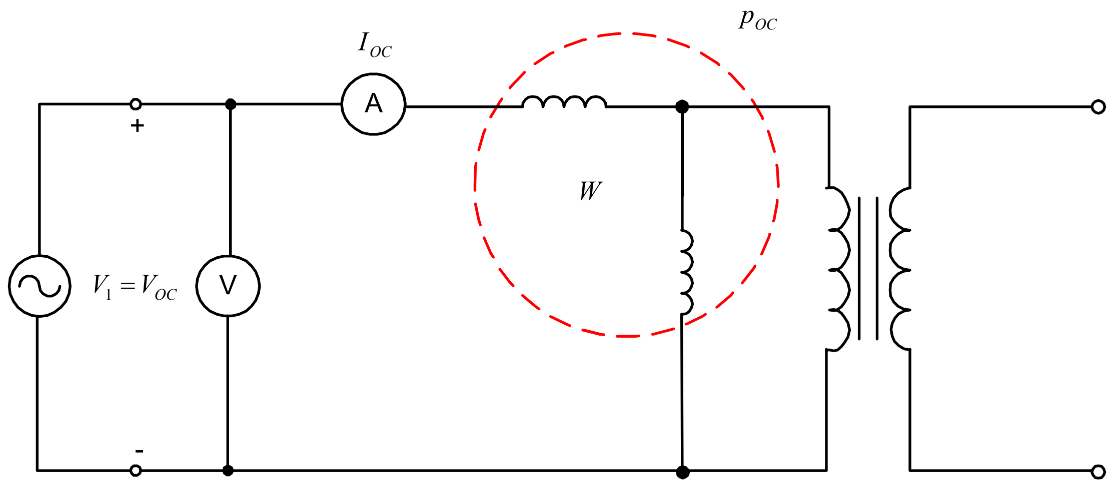
ت) شكل (٢ -١٩) الدائرة المكافئة لمحوّل فعلي مقاومة الملف الابتدائي منقولة للملف الثانوي

حساب مكوّنات الدائرة المكافئة

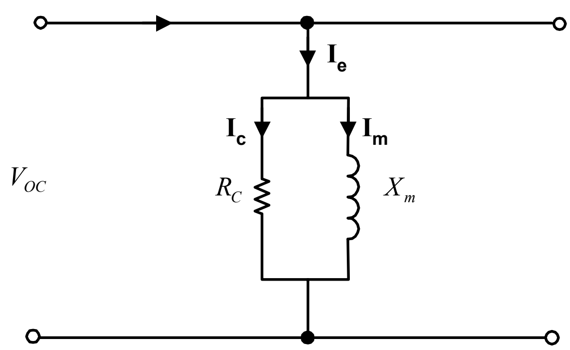
يكون من الصعب معرفة جميع مكوّنات الدائرة المكافئة ماعدا لمن قام بتصميم هذه المحوّلات . عند ذلك فإنه يتوجب إيجاد طرق لمعرفة بعض مكوّنات الدائرة المكافئة لمعرفة خصائص المحوّل وحساب هذه المكوّنات . ويتم ذلك بإجراء اختبارين هما اختبار الدائرة المفتوحة واختبار الدائرة المقصورة .

٢ -٨ -١ اختبار الدائرة المفتوحة The Open-Circuit Test

الغرض من هذا الاختبار هو حساب سماحية الاستثارة $Y_e(\frac{1}{R_e - jX_m})$ ، مفاقيد اللاحمل ، تيار الاستثارة عند اللاحمل (عدم التحميل) ومعامل القدرة عند عدم التحميل ، ويتم هذا الاختبار بتوصيل جانب المحوّل الابتدائي لمصدر الجهد وترك الجانب الثانوي مفتوحاً أو العكس . ويتم قياس التيار والقدرة المسحوبة من مصدر الجهد كما يبين الشكل (٢ -٢٠) أ .



أ. دائرة توضح اختبار الدائرة المفتوحة



ب. الدائرة المكافئة

شكل (٢ -٢٠) اختبار الدائرة المفتوحة

بذلك تكون مكوّنات الدائرة كالتالي :

$$\cos\theta_{OC} = PF_{OC} = \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \qquad (٢ -٣٥)$$

حيث إن :

PF_{OC} هو معامل القدرة لاختبار الدائرة المفتوحة

θ_{OC} هي زاوية سماحية الاستثارة

$$Y_e = Y_{OC} = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta_{OC} = \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_m} \qquad (٢ -٣٦)$$

حيث إن Y_e هي سماحية الاستثارة أو سماحية اختبار الدائرة المفتوحة

$$R_C = \frac{1}{G_C} \qquad (٢ -٣٧)$$

$$X_m = \frac{1}{B_m} \qquad (٢ -٣٨)$$

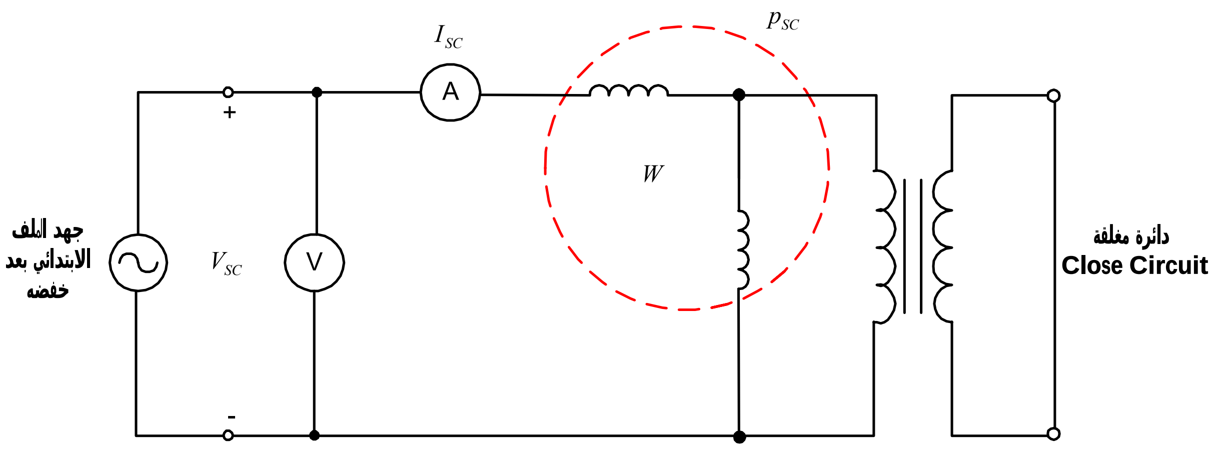
حيث إن :

$$G_C \cong G_{OC} = \frac{P_{OC}}{V_{OC}^2} \qquad (٢ -٣٩)$$ موصلية مفاقيد الحديد

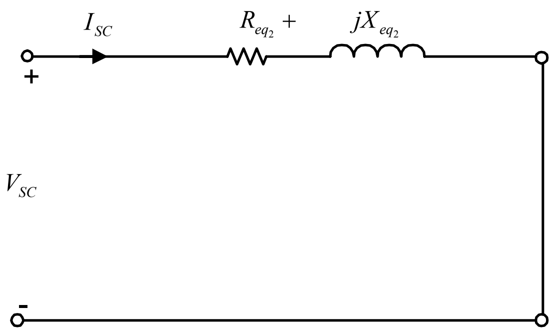
$$B_m \cong B_{OC} = (Y_{OC}^2 - G_{OC}^2)^{1/2} \qquad (٢ -٤٠)$$

٢ -٨ -٢ اختبار الدائرة المقصورة The Short Circuit Test

يتم هذا الاختبار بقصر أحد طرفي الملف وعادة ما يكون جانب الجهد المنخفض وتسليط جهد منخفض على جانب الجهد العالي وهو عبارة عن نسبة من الجهد المقنن للمحوّل على جانبيه الابتدائي ، وعادة ما يكون ٢٪ إلى ١٢٪ من الجهد المقنن للمحوّل . ويتم زيادة هذا الجهد حتى يصل التيار في ملفات الدائرة المقصورة إلى القيمة المقننة كما يبين الشكل (٢ -٢١) أ .



أ. دائرة توضح اختبار الدائرة المقصورة



ب. الدائرة المكافئة

شكل (٢ - ٢١) اختبار الدائرة المقصورة

الغرض من هذا الاختبار هو حساب المقاومة والمفاعلة المكافئة للمحوّل كما يلي :

$$Z_{SC} = Z_{eq_1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \qquad (٢-٤١)$$

$$PF_{SC} = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \qquad (٢-٤٢)$$

حيث إن :

$$Z_{eq_1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle\theta_{SC} = R_{eq1} + jX_{eq1} \qquad (٢-٤٣)$$

و

$$R_{eq_1} = R_1 + a^2 R_2 \qquad (٢-٤٤)$$

$$X_{eq_1} = X_1 + a^2 X_2 \qquad (٢-٤٥)$$

وبذلك فإنه :

$$R_{eq_1} \cong R_{SC} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \qquad (٢-٤٦)$$

$$X_{eq_1} \cong X_{SC} = \left(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2\right)^{1/2} \qquad (٢-٤٧)$$

ومن هذه الحالة فإن المقاومة والممانعة في الجانب الثانوي نقلت للجانب الابتدائي وبذلك فإن :

$$R_1 = a^2 R_2 = \frac{R_{eq_1}}{2} \qquad (٢-٤٨)$$

$$X_1 = a^2 X_2 = \frac{X_{eq_1}}{2} \qquad (٢-٤٩)$$

مثال ٢ -٤ :

محوّل توزيع 15 KVA , 7500/480V- 60 Hz . تم إجراء اختبار الدائرة المفتوحة (O.C.T) واختبار الدائرة المقصورة (S.C.T) على الجانب الابتدائي وتم أخذ القراءات التالية :

	اختبار الدائرة المفتوحة على الجانب الابتدائي	اختبار الدائرة المقصورة
Voltmeter	$V_{OC} = 7500V$	$V_{SC} = 366V$
Ammeter	$I_{OC} = 0.2006A$	$I_{SC} = 2A$
Wattmeter	$P_{OC} = 180W$	$P_{SC} = 300W$

احسب قيمة المقاومة المكافئة في الجانب الابتدائي .

الحل :

معامل القدرة في حالة اختبار الدائرة المفتوحة يمكن حسابه كالتالي :

$$PF_{OC} = \cos\theta_{OC} = \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} = \frac{180}{7500 \times 0.2006} = 0.1196 \quad \text{متأخر}$$

ومن ثم يمكن حساب سماحية الاستثارة من المعادلة ٢ -٣٦ كالتالي :

$$Y_e = Y_{OC} = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\cos^{-1} PF_{OC}$$

$$Y_e = \frac{0.2006}{7500} \angle -\cos^{-1}(0.1196)$$

$$= 0.0000267 \angle -38.129 \quad S$$

$$= 0.0000032 - j0.0000265 \quad S$$

$$= \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_m}$$

وبذلك فإن :

$$R_C = \frac{1}{0.0000032} = 312500 \quad \Omega \quad \cong \quad 312.5k\Omega$$

$$X_m = \frac{1}{0.0000265} = 37735.85 \quad \Omega \quad \cong \quad 37.736k\Omega$$

ومعامل القدرة في اختبار الدائرة المقصورة هو :

$$PF_{SC} = \cos\theta sc = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}}$$

$$= \frac{300}{366 \times 2} = 0.41$$ متأخر

∴ المقاومة المكافئة من المعادلة (٢ -٤٣) هي :

$$Z_{eq_1} = Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \cos^{-1} PF$$

$$= \frac{366}{2} \angle \cos^{-1} 0.41 = 183 \angle 65.81 \qquad \Omega$$

$$= 75 + j166.93 \quad \Omega$$

كفاءة المحوّل Transformer Efficiency

كفاءة أي جهاز كهربائي تعرف كنسبة القدرة الخارجة إلى القدرة الداخلة وبذلك فإن :

$$\zeta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{loss}} \qquad (٢ -٥٠)$$

حيث أن :

- P_{out} القدرة المعطاة من المحوّل
- P_{in} القدرة التي يستهلكها المحوّل
- P_{loss} القدرة المفقودة

ويمكن كتابة المعادلة (٢ -٥٠) كالتالي :

$$\zeta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}}$$

$$= 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \qquad (٢ -٥١)$$

حيث إن القدرة في المحوّل هي عبارة عن المفاقيد في القلب الحديدي والمفاقيد النحاسية وبذلك فإن P_{in} هي

$$P_{in} = P_{out} + P_{core} + P_{Cu} \qquad (٢ -٥٢)$$

حيث إن :

- المفاقيد في القلب الحديدي P_{core}
- المفاقيد النحاسية P_{Cu}

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos\theta = S_{out} \cos\theta \qquad (٢ -٥٣)$$

حيث $\cos\theta$ هو معامل القدرة للحمل

وبذلك فإن كفاءة المحوّل :

$$\zeta = \frac{V_2 I_2 \cos\theta}{V_2 I_2 \cos\theta + P_{core} + P_{Cu}} \qquad (٢ -٥٤)$$

حيث إن :

$$P_{Cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

$$= I_1^2 R_{eq_1} \qquad (٢ -٥٥)$$

$$= I_2^2 R_{eq_2} = P_{SC}$$

و

$$P_{core} = P_{OC} \qquad (٢ -٥٦)$$

ويمكن الحصول على أعلى كفاءة للمحوّل عندما تكون $P_{core} = P_{OC}$

٢ -١٠ معامل تنظيم الجهد للمحوّل Voltage Regulation of a Transformer

معامل تنظيم الجهد للمحوّل ما هو إلا معدل التغير في قيمة الجهد على أطراف الملفات الثانوية من حالة عدم التحميل إلى حالة التحميل الكامل ، وعندما يكون الجهد على أطراف الملفات الابتدائية ثابتاً. ودائماً يعبر عنه بنسبة مئوية من قيمة التحميل الكامل للمحوّل.

$$\%\ Voltage\ Regulation = \frac{V_2(no\ \ load) - V_2(full\ \ load)}{V_2(full\ \ load)} \times 100 \qquad (٢ -٥٧)$$

وبما أنه عند عدم التحميل يكون $V_2(no\ \ load) = \frac{V_1}{a}$

فإن معامل التنظيم يكون

$$\%\ Voltage\ Regulation = \frac{\frac{V_1}{a} - V_2(full\ \ load)}{V_2(full\ \ load)} \times 100 \qquad (٢ -٥٨)$$

وعندما تكون مقاومة الملف الثانوي منقولة لجهد الملف الابتدائي فإنه يمكن حساب الجهد على أطراف الملف الابتدائي من المعادلة التالية :

$$V_1 = aV_2 + I_1 Z_{eq_1} \qquad (٢ -٥٩)$$

$$V_1 = aV_2 + I_1 R_{eq_1} + jI_1 X_{eq_1} \qquad (٢ -٦٠)$$

وعندما تكون مقاومة الملف الابتدائي منقولة لجهد الملف الثانوي فإن الجهد على أطراف الملف الابتدائي يمكن حسابه كالتالي :

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 Z_{eq_2} \qquad (٢ -٦١)$$

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 R_{eq_2} + jI_2 X_{eq_2} \qquad (٢ -٦٢)$$

ملاحظة: يكون معامل التنظيم صفر عند معامل القدرة يساوي الواحد وسالب عند معامل القدرة المتقدم وموجب عند معامل القدرة المتأخر .

مثال ٢ -٥ :

محوّل 100KVA ,200/240V-60Hz . أجريت عليه اختبارات الدائرة المغلقة والمفتوحة وتم تسجيل البيانات التالية :

اختبار الدائرة المغلقة (على الابتدائي)	اختبار الدائرة المفتوحة على الجانب الابتدائي	
$V_{SC} = 250V$	$V_{OC} = 7500V$	**Voltmeter**
$I_{SC} = 13.889A$	$I_{OC} = 0.65A$	**Ammeter**
$P_{SC} = 1420W$	$P_{OC} = 425W$	**Wattmeter**

بافتراض أن المحوّل يعمل عند الحمل الكامل بمعامل قدرة متأخر ٠,٩ ، احسب :

أ - المقاومة المكافئة ومقاومة المحوّل منقولة للجزء الابتدائي .

ب - المقاومة الكلية عند الحمل الكامل .

ج - كفاءة المحوّل .

د - معامل تنظيم الجهد للمحوّل .

الحل : أ .

$$Z_{eq_1} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = \frac{250}{13.889} = 18 \ \ \Omega$$

$$R_{eq_1} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}} = \frac{1420}{(13.889)2} = 7.36 \ \ \Omega$$

$$X_{eq_1} = \left(Z_{SC}^2 - R_{SC}^2\right)^{1/2} = \left(18^2 - 7.36^2\right)^{1/2} = 16.43 \ \ \Omega$$

ب. تيار الحمل الكامل يمكن حسابه كالتالي :

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{100000VA}{7200V} = 13.89 \quad A$$

من المعادلة رقم (٢ -٥٢) يمكن حساب مفاقيد النحاس كالتالي :

$$P_{Cu} = I_1^2 R_{eq_1} = 13.89^2 \times 7.36 = 1419.98 \quad W$$

ومن المعادلة (٢ -٥٦) فإن :

$$P_{core} = P_{OC} = 425 \quad W$$

∴ **جميع المفاقيد الكلية تكون :**

$$P_{loss} = P_{Cu} + P_{core}$$

$$= 1419.98 + 425 = 1844.98 \quad W$$

ج. من المعادلة (٢ -٥٣) فإن القدرة P_{out} الخارجة من المحوّل هي :

$$P_{out} = S\cos\theta = 100KVA \times 0.9 = 90kW$$

من المعادلة (٢ -٥٢) فإنه :

$$P_{in} = 90000 + 1844.95 = 91844.98W$$

والآن يمكن حساب كفاءة المحوّل من المعادلة (٢ -٥١):

$$\zeta = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{1844.98}{91844.98} = 0.9799$$

د. باستخدام المعادلة (٢ -٦٠) فإن الجهد على أطراف الملف الابتدائي هو :

$$V_1 = aV_2 + I_1\left(R_{eq_1} + jX_{eq_1}\right)$$

$$= 7200\angle 0^0 + \left(13.89\angle -25.84^0\right)\left(7.36 + j16.43\right)$$

$$= 7393.19\angle 1.25^0 V$$

$$\therefore \quad \%V\,\mathrm{Re}\,q = \frac{V_1 - aV_2}{aV_2} \times 100$$

$$= \frac{7393.19 - 7200}{7200} \times 100 = 2.68$$

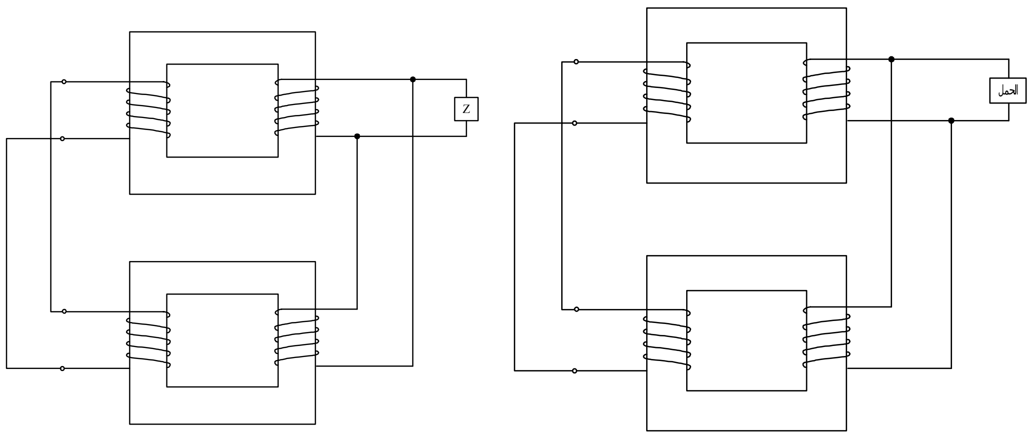
أو $V\,\mathrm{Re}\,q = 2.68 \quad \%$

المحوّلات ثلاثية الأوجه

عندما تحدث توسعات في التحميل فإنه يجب إضافة محوّلات لأن أجهزة تحويل القدرة الموجودة ستحتاج إلى سعة أكبر ، وفي هذه الحالة يجب توصيل مجموعة من المحوّلات معاً.

٢ -١١ -١ طرق التوصيل للمحوّلات (التشغيل على التوازي) :

في الحمل المغذى بالقدرة من محوّل واحد ، إذا زاد الحمل فإن سعة المحوّل تصبح في بعض الأحيان غير كافية ، وإذا كانت الحالة هكذا يتم إقامة محوّل آخر بسعة تستطيع الاستجابة للحمل المتوسع ويوصل على التوازي مع المحوّل المجود كما هو مبين في الشكل (٢ -٢٢) ، وهذا يسمى بالتشغيل على التوازي



(أ) (ب)

شكل ٢ -٢٢ توصيل التوازي لمحوّل أحادي الوجه

وعندما توصل المحوّلات على التوازي فإن التوصيل يجب عمله بحيث يصبح اتجاه اللف لملف المحوّل الذي نعتبره كما هو مبين في الشكل ٢ -٢٢ (أ) ، وإذا كان اتجاه الملف للمحوّلات عند الجانب الثانوي معاكساً كل منهما للآخر كما هو مبين في الشكل ٢ -٢٢ (ب) فإن الجانب الثانوي سيتم قصر دائرته ويسري تيار دوراني كبير جداً يمكن أن يحرق الملفات .

٢ -١١ -٢ شروط التشغيل على التوازي :

عند إجراء التشغيل على التوازي بتوصيل محوّلين فإن كل محوّل يجب أن يشارك بتيار لا يزيد على مواصفات كل محوّل ؛ ولهذا الغرض فإنه يجب الوفاء بالمتطلبات الآتية :

١. يجب أن تتطابق القطبية لكلا المحوّلين .
٢. يجب أن تكون نسبة اللف متساوية لكلا المحوّلين.

٣. يجب أن تتساوى نسبة مقاومة اللفائف إلى المفاعلة المتسربة R/X لكلا المحوّلين .

٤. يجب أن تتساوى المعاوقة لكلا المحوّلين

إذا لم يتم الوفاء بالمتطلب الثالث فإن الجهد عند كل محوّل يكون مختلفاً ؛ وبالتالي سيكون غير متوازن . المتطلب الرابع مهم وذلك لتوزيع تيار متناسب مع الخرج المقدر لكل محوّل .

٣,١١,٢ - توصيل المحوّلات ثلاثية الأوجه :

في أنظمة القدرة ثلاثية الأوجه من الضروري رفع أو خفض الجهد في مواضع مختلفة من النظام ، وهذا يتم إما عن طريق محوّلات ذات وجه واحد متطابقة بحيث يتم توصيل محوّل واحد لكل وجه أو استخدام محوّل ثلاثي الأوجه ، وفي كل حالة فإن كل وجه له ملف ابتدائي وملف ثانوي ، وتلك الملفات يتم توصيلها إما دلتا (Δ) أو نجمة (Y) . ويوجد

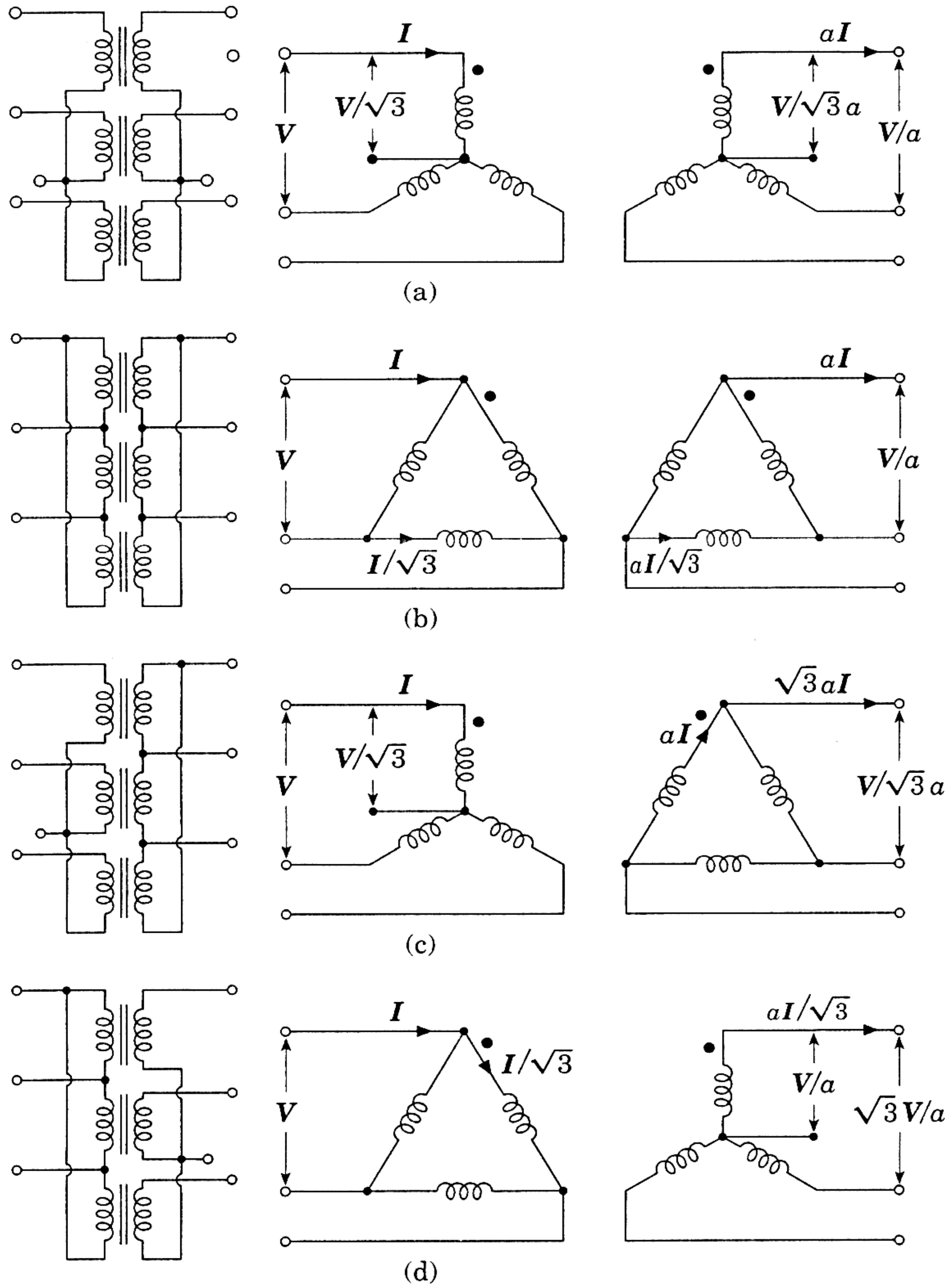
أربع طرق ممكنة للتوصيل كما بالشكل (٢ -٢٣) وهي :

$Y-Y$ نجمة نجمة كما في الشكل (٢ -٢٣) (a)

$\Delta-\Delta$ دلتا دلتا كما في الشكل (٢ -٢٣) (b)

$Y-\Delta$ نجمة دلتا كما في الشكل (٢ -٢٣) (c)

$\Delta-Y$ دلتا نجمة كما في الشكل (٢ -٢٣) (d)



شكل (٢ -٢٣) توصيل محوّل ثلاثي الأوجه

ويتميز توصيل المحوّل بطريقة نجمة (Y) أنه يوفر خط التعادل (N) وبذلك يمكن الحصول على جهد وجه واحد .

• **توصيلة نجمة - نجمة (Y – Y)**

في توصيله Y – Y للمحوّل يتم عمل توصيله Y عند كل من الجانبين الأولي والثانوي لكل محوّل .
وتيار الاستثارة لكل محوّل يحتوي على التوافقية الثالثة بالإضافة إلى المحوجة الأساسية ، وهذه التوافقية الثالثة لها نفس الوجه لكل زاوية وجهية ؛ وبالتالي فليست هناك دائرة لجريان التوفيقات الثوالث في توصيل Y – Y ؛ ولذا يتشوه الشكل الموجي للجهد وذلك يتسبب في حدوث اضطراب ضجيجي في خطوط الاتصالات المجاورة ؛ ولهذا السبب فإن توصيل Y – Y يستخدم فقط في حالات خاصة بالرغم من أ ، له بعض المزايا مثل سهولة طريقة العزل للمحوّلات مقارنة بالطرق الأخرى.

• **توصيله دلتا - دلتا Δ – Δ**

توصيله Δ – Δ تجعل جهد الخط مساوياً لجهد ملفات المحوّل ؛ وبالتالي فإنه غير موات للعزل ، لذلك لا يستخدم للجهد العالي ولكن يستخدم لمحوّلات التوزيع التي تعمل عند جهود **تحت** 60KV .

• **توصيلة نجمة – دلتا Y – Δ**

وفيها يتم توصيل Y عند الجانب الأولي وتوصيل Δ عند الجانب الثانوي كما في شكل (٢ -٢٣) ج .ويكون الجهد على الجانب الثانوي مساوياً لجهد الخط (جهد الوجه) .
وتستخدم توصيلة Y – Δ عند تخفيض الجهد مثل طرف الاستقبال في نهاية خط نقل القدرة الكهربائية .

• **توصيله دلتا – نجمة Δ – Y**

توصيله Δ – Y لها تقريباً نفس مميزات توصيله نجمة – دلتا . ويتخلف جهد الملف الثانوي عن الابتدائي بزاوية $30°$. وتستخدم هذه التوصيله رفع الجهد .

• **توصيلة الحمل نجمة**

في حالة ما يكون الحمل موصل دلتا فإن جهد الوجه وجهد الخط يكونان متساويين بينما يكون تيار الخط متأخراً عن تيار الوجه بمقدار $30°$.

$$V_{L-L} = V_{P-P} \qquad (٢ -٦٣)$$

$$I_L = \sqrt{3}\ \ I_P \ \ \angle -30 \qquad (٢ -٦٤)$$

حيث إن الرمز P يمثل الوجه و L يمثل الخط.

• **توصيلة الحمل دلتا**

في حالة توصيل الحمل دلتا فإن تيار الخط وتيار الوجه متساويان بينما يتقدم جهد الخط على جهد الوجه ب $30°$

$$I_L = I_P \quad (٢-٦٥)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}\ V_{L-N}\angle 30° \quad (٢-٦٦)$$

- القدرة في المحرّك ثلاثي الوجه :

تكون القدرات المسحوبة بواسطة حمل ثلاثي الأوجه متزن كالتالي :

$P = \sqrt{3}V_{L-L}I_L\cos\theta$ القدرة الفعّالة

$Q = \sqrt{3}V_{L-L}I_L\sin\theta$ القدرة غير الفعّالة

$S = \sqrt{3}\ \ V_{L-L}\ \ I_L^*$ القدرة الظاهرية

حيث إن :

$V_{L-L}(rms)$ الجهد بين خطين

$I_L(rms)$ تيار الخط

θ زاوية الوجه لممانعة الحمل

I_L Is the conjugate of I_L^*

- مسائل -

مسألة (١) :

محوّل وجه واحد 5KVA , 240-120 V ينقل تيار اسمي لحمل عند جهد 120 V .

احسب قيمة معاوقة الحمل بالجانب الابتدائي ؟

مسألة (٢) :

محوّل خفض يستخدم لتحويل الجهد من **13.8 KV** إلى **2.4 KV** وذلك عند الحمل الكامل عندما ينقل قدرة قدرها **100 KVA**.

احسب ما يلي :

أ - نسبة اللف .

ب - التيار الاسمي للملفات الابتدائية والثانوية .

ج - معاوقة الحمل منقولة للجانب الابتدائي.

د - معاوقة الحمل منقولة للجانب الثانوي .

مسألة (٣):

محوّل توزيع **60Hz –75KVA ,2400/240** له معاوقة مكافئة على الجانب الثانوي

$$Z_{eq_1} = 0.009318 + j0.058462\ \ \Omega$$

احسب معامل التنظيم للمحوّل في الحالات التالية :

أ - عند معامل قدرة متأخر **0.85**

ب - عند معامل قدرة يساوي الواحد .

ج - عند معامل قدرة متقدم **0.85**..

محوّل توزيع وجه واحد **500KVA , 2300-208 V , 60 Hz** أخذت له القراءات التالية :

	اختبار الدائرة المفتوحة	اختبار الدائرة المقصورة
Voltmeter	208 V	95 V
Ammeter	85A	217.4A
Wattmeter	1800 W	8200 W

احسب ما يلي :

أ - مكونات الدائرة المكافئة منقولة للجانب الابتدائي .

ب - الجهد على الجانب الابتدائي عندما ينقل المحوّل تيار اسمي عند معامل قدرة 0.8 لحمل حتي جهده 208V.

ج - كفاءة المحوّل معامل التنظيم للمحوّل .

مسألة (٤):

محوّل توزيع 2400/240, 75KVA – 60Hz له معاوقة مكافئة على الجانب الثانوي

$$Z_{eq_1} = 0.009318 + j0.058462 \ \ \Omega$$

احسب معامل التنظيم للمحوّل في الحالات التالية :

أ - عند معامل قدرة متأخر 0.85

ب - عند معامل قدرة يساوي الواحد .

ج - عند معامل قدرة متقدم 0.85.

مسألة (٥):

محول توزيع ثلاثي الأوجه **15 MVA 138/13.8 KV** يستخدم كمحول خفض.

احسب نسبة اللف (التحويل) للمحول في حالات التوصيل التالية :

١ - نجمة – دلتا

٢ - دلتا - نجمة

المحركات التأثيرية (الحثية) الثلاثية الأوجه
Three Phase Induction Motors

١,٣ - المقدمة

تستخدم هذه المحركات التأثيرية بكثرة في الصناعة لبساطة تركيبها وسهولة تشغيلها وكفاءتها العالية . حيث إن المحرك التأثيري يحتاج لمنبع تيار متردد ثلاثي الأوجه يوصل إلى العضو الثابت فقط ، أما العضو الدائر لا يوصل بأي مصدر ومغلق على نفسه ويتولد به قوة دافعة كهربية بالتأثير ، لذلك سمى بالمحرك التأثيري وسرعة هذا المحرك لا تتغير كثيراً مع زيادة الحمل إلا في حدود ٥٪ مما يجعل هذا المحرك شائع الاستعمال .

٢,٣ - التركيب:

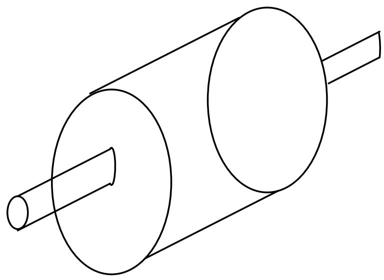
يتركب المحرك التأثيري من عضو ثابت وعضو متحرك وكلاهما مصنوع من رقائق الحديد المعزولة لتقليل التيارات الإعصارية في الحديد ومن ثم تقليل المفاقيد الحديدية .

يوجد بالعضو الثابت مجارٍ بها ثلاثة ملفات من النحاس موزعة على المجاري بطريقة لف معينة بحيث يكون بين كل ملف والآخر ١٢٠درجة كهربية وتعطى مجال مغناطيسي عبارة عن أقطاب مغناطيسية ، عدد هذه الأقطاب يتوقف عليه سرعة المحرك كما يبين ذلك نظرية العمل ، وتوصل الملفات الثلاثية بمنبع تيار متردد ثلاثي الأوجه أما العضو الدائر فيوجد منه نوعان في تكوينه بينهما تتقارب الخواص الكهربية لهما ويسمى المحرك باسم عضوه الدائر للتمييز بين النوعين وهما المحركات ذات العضو الدائر الملفوف (ذو حلقات الانزلاق) والمحركات ذات القفص السنجاب .

أما النوع الأول للعضو الدائر الملفوف فيتكون من جسم أسطواني من رقائق الحديد المعزولة وبعضها على سطحها يوجد مجارٍ ويشبه منتج آلات التيار المستمر وتحتوى المجاري على ملفات ثلاثية الأوجه وتشبه ملفات العضو الثابت وتوصل هذه الملفات مع بعضها على شكل دلتا أو نجمة حسب ظروف التشغيل وفي الحالتين توصل أطراف الملفات على حلقات انزلاق ثلاث مركبة على نفس عمود الدوران وبذلك يمكن توصيل هذه الملفات بدائرة خارجية عن طريق ثلاث فرش مركبة على حلقات الانزلاق وهذا ما يتم في حالة توصيل الملفات بدائرة خارجية من مقاومة تساعد في بدء الحركة وكذلك تنظيم سرعة المحرك كما سوف يوضح فيما بعد ، ويوضح شكل (١ -أ) هذه الملفات وتوصيلها بحلقات الانزلاق . ولذلك فيتميز هذا النوع بإمكانية تغير خواص تشغيله على نطاق واسع عن طريق الدائرة الخارجية.

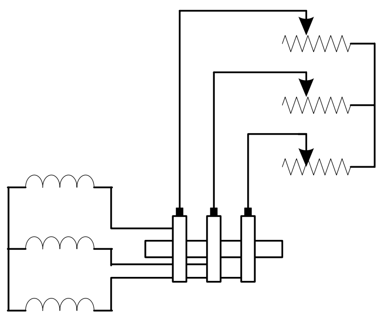
أما النوع الثاني فهو القفص السنجاب ويتكون هذا النوع من جسم أسطواني من رقائق أيضا وبه مجارٍ ولكن بدلاً من الملفات توضع قضبان من النحاس أو الألومنيوم وتتصل من الناحيتين عن طريق حلقتين من نفس نوع معدن القضبان .

ويوضح شكل (٣ - ١ -ب) هذا النوع من المحركات ويلاحظ أنه لا يمكن اتصال هذا النوع من العضو الدائر بأي دائرة خارجية ولذلك لا يمكن عن طريقه بدء الحركة أو حتى تنظيم السرعة.



عضو دائر من النوع قفص السنجاب

(٣ - ب)



عضو دائر ملفوف ومتصل

بمقاومة بدء الحركة وتنظيم السرعة

(٣ - أ)

شكل ٣ -١

ولكن لا تختلف نظرية التشغيل وكذلك الخواص الكهربية لكلا المحركين سواء عضو دائر ملفوف أو قفص السنجاب نظراً لأن كليهما مقصور ويتلاءم مع أي عدد من الأقطاب على العضو الثابت وكذلك عدد الأوجه مما يجعل خواص التشغيل متشابهة تماماً .

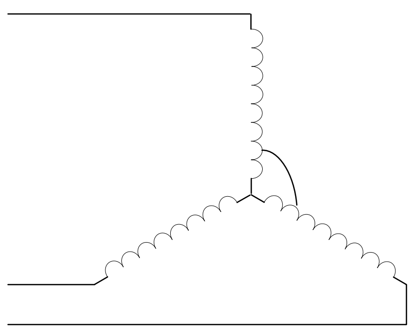
٣,٣ - المجال المغناطيسي الدوار **Rotating Magnetic Field**

عند توصيل ملفات ثلاثية ملفوفة بحيث تفصل بينهما البعض زاوية في الفراغ مقدارها ١٢٠ درجة كهربية بتيار متغير ثلاثي الأوجه " Three Phase Supply " يفصل بينهما زاوية مرحلية زمنية تساوي ١٢٠درجة كهربية أيضاً فإنه ينشأ مجال مغناطيسي يطلق عليه مجال مغناطيسي دوار ويمكن برهان هذا المجال باستخدام حساب المثلثات كالآتي :

المنبع الثلاثي الأوجه له ثلاثة جهود متساوية في المقدار ومختلفة في الزمن وهذه الجهود تولد تيار كهربي يأخذ نفس المعادلة وكذلك التيار يولد مجال مغناطيسي . فيمكن وصف المجال الثلاثي الأوجه بالمعادلات التالية : -

$$\phi_1 = \phi_m \cos \omega t$$
$$\phi_2 = \phi_m \cos(\omega t - 120)$$
$$\phi_3 = \phi_m \cos(\omega t - 240)$$

وبما أن هذه المجالات الثلاثة موزعة على ثلاث ملفات بين كل ملف والآخر ١٢٠ درجة في الفراغ فإذا رمزنا لزاوية الفراغ بالرمز θ فإن محصلة المجال المغناطيسي الكلي للثلاث ملفات يكون كالتالي : -



$$\phi_t = \phi_m \cos \omega t \cos \theta + \phi_m \cos(\omega t - 120)\cos(\theta - 120) + \phi_m \cos(\omega t + 120)\cos(\theta + 120)$$

ولنتمكن من جمع هذه المعادلات نستخدم العلاقة المثلثية الآتية

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2}\cos(A - B) + \frac{1}{2}\cos(A + B)$$

وبتطبيق ذلك على معادلة المجال نجد أن المحصلة الكلية تكون :

$$\phi_t = \frac{3}{2}\phi_m \cos(\omega t - \theta)$$

والقيمة العظمى لهذه المعادلة عندما تكون الزاوية تساوي صفراً

$$\omega t - \theta = 0$$
$$\omega t = \theta$$

بما أن ωt تزيد مع الزمن ، إذن θ تزيد بنفس المعدل لذلك نقول إن القيمة العظمى للمجال المغناطيسي تدور حول المحيط بنفس سرعة ωt .

وهذا يكافئ تأثير مجال مغناطيسي من أقطاب تدور بسرعة ثابتة تتوقف على عدد هذه الأقطاب وكذلك تردد المنبع الثلاثي الأوجه الموصل إليه الملفات الثلاثية وتسمى هذه السرعة بسرعة التزامن n_S Synchronous Speed .

ويربطها مع التردد وعدد الأقطاب العلاقة :

$$f = P\frac{n_s}{60} \quad c/s \qquad (٣ - ١)$$

حيث :

التردد للمنبع f

عدد أزواج الأقطاب P

سرعة التزامن n_S

ويمكن كتابتها بصورة أخرى

$$n_s = \frac{60f}{P} \quad rpm \qquad (٣ - ٢)$$

ويكون هذا المجال متشابكاً أو متقاطعاً مع كل ملفات العضو الثابت والعضو الدائر في نفس الوقت وهذا يشبه المجال المغناطيسي المتبادل بين الملف الابتدائي والثانوي في حالة المحول .

وتتوقف قيمة القوة الدافعة المغناطيسية " التي يتوقف عليها المجال " على القيمة الفعالة للتيار لكل وجه وعدد لفات الوجه الواحد وعدد الأقطاب وكذلك معامل اللف والذي يتوقف على طريقة لف ملفات العضو الثابت وتعطى هذه القوة الدافعة المغناطيسية الأمبير لفات من المعادلة

$$AT = 1.35\frac{T_{ph}}{P} I_{ph} K_w \quad Amper)turn/pole \qquad (٣ - ٣)$$

ويلاحظ أن قيمة هذه القوة الدافعة المغناطيسية ثابتة في المقدار وتساوي مرة ونصف المرة القوة الدافعة المغناطيسية لوجه واحد . وتدور بسرعة هي سرعة التزامن التي سبق الإشارة إليها والتي تعطى من المعادلة (٣ - ٢) .

٤,٣ - نظرية عمل المحرك : -

أ - المحرك عند الوقوف " لحظة بدء التشغيل "

بمقارنة تركيب المحرك والذي سبق توضيحه بتركيب المحول يلاحظ أنهما متشابهان تماماً إلا في اختلاف الدائرة المغناطيسية وهي تحتوى في حالة المحرك على ثغرة هوائية كبيرة وهي تلك التي توجد بين العضو الثابت والعضو الدائر.

وفي هذه الحالة تشبه ملفات العضو الثابت في المحرك الملفات الابتدائية وهي التي توصل بالمنبع الثلاثي الأوجه وملفات العضو الدائر هي الملفات الثانوية والتي تكون مقصورة على نفسها ويمكن بذلك اعتبار المحرك يعمل على نمط محول دائرته الثانوية مقصورة .

عند توصيل ملفات العضو الثابت إلى موجة منبع ثلاثي الأوجه جهده موجة جيبية فإنه يمر تيار مغطسة في هذه الملفات يكون أيضاً على شكل موجة جيبية وينشأ عن مرور هذا التيار فيض مغناطيسي تقريباً ذو موجة جيبية تدور في اتجاه الموجب وسرعة تزامن n_S لفة/دقيقة .

ويتشابك هذا الفيض المغناطيسي الدوار مع ملفات كل من العضو الثابت والعضو الدائر وقيمته ϕ_m وبر لكل قطب وهذه القيمة ثابتة المقدار ولا تتأثر بمقدار الحمل على المحرك .

نتيجة لقطع المجال لملفات العضو الثابت يتولد ق.ء.ك (٣ - قوة دافعة كهربية مضادة) E_1 لكل وجه وتكون معادلتها مثل نظريتها في حال المحول كما يلي :

$$E_1 = 4.44 f_1 \phi_m N_1 \quad Volts \qquad (٣ - ٤)$$

حيث

تردد المنبع الموصل عليه المحرك f_1

عدد لفات العضو الثابت لكل وجه N_1

وحيث إن العضو الدائر في حالة سكون فإن المجال الدوار يقطع ملفات العضو الدائر بنفس التردد أي بنفس السرعة فيتولد فيها ق.ء.ك في هذه اللحظة E_{20} وتعطى من المعادلة

$$E_{20} = 4.44 f_1 \phi_m N_2 \quad Volts \qquad (٣ - ٥)$$

حيث تردد هذا الجهد هو نفسه تردد المجال الدوار أو بمعنى آخر تردد المنبع

عدد لفات العضو الدائر لكل وجه N_2

ونظراً لأن ملفات العضو الدائر مقصورة فيمر فيها تيار يعطى عند هذه اللحظة من المعادلة

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{Z_{20}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \qquad (٣ - ٦)$$

وعندما يمر هذا التيار في موصلات العضو الدائر في نفس الوقت الذي يوجد فيه هذا الموصل في مجال مغناطيسي فينشأ عزم دوران على هذا العضو فيدفعه إلى الدوران في نفس اتجاه المجال الدوار وتتوقف قيمة العزم على التيار المار في موصلات العضو الدائر وكذلك على مقدار الفيض المغناطيسي الموجود في هذا العضو .

من المعادلة (٣ - ٥) ، (٣ - ٦) يمكن استنتاج علاقة الجهد لحظة بدء التشغيل بين الجهد الابتدائي والثانوي المتولد لكل وجه

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (٣ - ٧)$$

ب -المحرك عند الدوران بدون حمل :

عندما يدور العضو الدائر في اتجاه المجال المغناطيسي الدوار كما سبق توضيحه فإن سرعة قطع المجال الدوار لملفات العضو الدائر تقل أو تنقص سرعة القطع وتكون السرعة النسبية للمجال المغناطيسي الدوار بالنسبة لملفات العضو الدائر عندما يدور بسرعة n هي ما يسمى سرعة الانزلاق " Slip Speed " .

$$Slip \quad speed = n_s - n \qquad (٣ - ٨)$$

وهذه السرعة منسوبة لسرعة التزامن تعطى معامل هام وهو معامل الانزلاق ويرمز له بالرمز S " Slip " ويعطى من المعادلة

$$S = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$S\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \qquad (٣ - ٩)$$

ويلعب هذا المعامل دور هام جداً في تحديد خواص تشغيل المحرك كما سوف يوضح فيما بعد . وعندما تصل سرعة قطع المجال الدوار للعضو الدائر إلى سرعة الانزلاق فإن ق.ء.ك المتولدة فيه تنقص بنفس النسبة فإذا رمزنا لهذه ق.ء.ك عند الدوران بالرمز E_2 فإن قيمتها وكذلك ترددها يتغير وفقاً للمعادلات

$$E_2 = 4.44 f_2 \phi_m N_2 \qquad (٣ - ١٠)$$

ويعطى التردد من المعادلة

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{n_s - n}{n_s} = S \qquad (٣ - ١١)$$

$$\therefore f_2 = S f_1 \qquad (٣ - ١٢)$$

ترتبط ق.ء.ك عند بدء التشغيل بالعلاقة :

$$\frac{E_2}{E_{20}} = \frac{n_s - n}{n_s} = S \qquad (١٣ - ٣)$$

$$\therefore E_2 = SE_{20} \qquad (١٤ - ٣)$$

ومن هذه المعادلة التوضيحية يتضح أن العضو الدوار يدور بسرعة قريبة من سرعة التزامن عند اللاحمل بالقدر المكافئ لتوليد ق.ء.ك وتيار في ملفات الثانوي تكفي لتوليد العزم المطلوب عند اللاحمل ويكون الانزلاق في حالة اللاحمل قريب جداً من الصفر (٠,١٪ ، ٠,٢٪ وقد يصل في المحركات الكبيرة إلى ٠,٠٥٪) . وتقل السرعة عند تحميل المحرك حيث يكون معامل الانزلاق عند الحمل الكامل ما بين ٣٪ إلى ٥٪ .

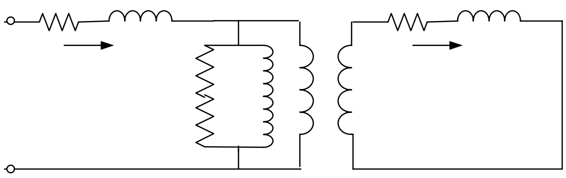
وتكون دائرة المحرك المكافئة التي تشبه إلى حد كبير دائرة المحول المكافئة كما هو موضح بالشكل (٣ - ٢) فيما عدا أن الدائرة الثانوية دائماً مقصورة عند لحظة البدء .

ويكون التيار في الدائرة الثانوية تقريباً صفر وذلك لاقتراب السرعة من سرعة التزامن .

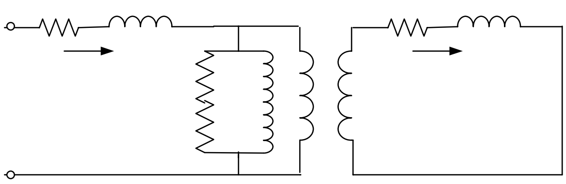
وشكل (٣ - ٣) يوضح الدائرة المكافئة في هذه الحالة (حالة اللاحمل) .

ملاحظة :

لو حدث ووصلت سرعة العضو الدائر إلى سرعة التزامن فإنه في هذه اللحظة يكون المحرك في حالة انعدام العزم تماماً ، وعندها يكون التيار وكذلك ق.ء.ك في الدائرة الثانوية صفراً وعندما ينعدم العزم فتقل السرعة . وعند هذا يزيد التيار فينشأ عزم ، وهكذا يحافظ المحرك دائماً على سرعة مناسبة لتوليد ق.ء.ك وكذلك تيار في الدائرة الثانوية ومن ثم عزم دوران يتناسب مع مقدار الحمل المحمل به المحرك ، هذا يوضح أهمية ما يسمى بمعامل الانزلاق S .



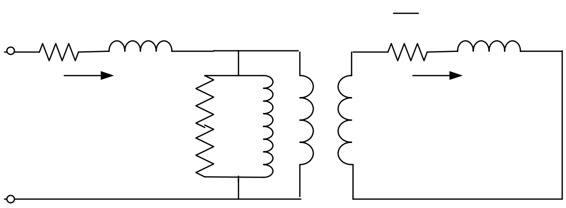
شكل (٣ -٢) في حالة السكون



شكل (٣ -٣) في حالة الاحمل

ج - المحرك عند التحميل : -

عند أي سرعة للمحرك n مناظرة لمعامل الانزلاق S فإن ق.ء.ك تتغير إلى $E_2 = SE_{20}$ وتشبه الدائرة المكافئة تلك التي يوضحها شكل (٣ - ٣) فيما عدا أن $I_2 \neq 0$ ويمكن رسم هذه الدائرة بطريقة أخرى كما في شكل (٣ - ٤) . حيث قسمت كل مكونات الدائرة الثانوية على S لتصبح مشابهة لتلك في شكل (٣ - ٤)



شكل (٣ -٤) في حالة الحمل الكامل

وكما هو الحال في حالة المحول تكون العلاقات لكل من الجهود والتيارات والمقاومات كما يلي :

$$\frac{I_2^1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (٣ - ١٥)$$

$$\frac{E_1}{E_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (٣ - ١٦)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2^1 + \bar{I}_o \quad (٣ - ١٧)$$

$$\bar{I}_o = \bar{I}_\mu + \bar{I}_m \quad (٣ - ١٨)$$

$$I_\mu = I_o \cos\phi_o \quad (٣ - ١٩)$$

$$I_\mu = I_o \sin\phi_o \quad (٣ - ٢٠)$$

وكذلك كل من R_o ، X_o الممثلين للدائرة المكافئة للدائرة المغناطيسية قيمتها كما يلي لكل وجه

$$R_o = \frac{V_1}{I_m} \quad (٣ - ٢١)$$

$$X_o = X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (٣ - ٢٢)$$

ويمكن أيضاً نسب مكونات الدائرة الثانوية إلى الدائرة الابتدائية حيث $a = \frac{N_1}{N_2}$ نسبة التحويل

$$R_2^1 = R_2 . a^2 \quad (٣ - ٢٣)$$

$$X_2^1 = X_2 . a^2 \quad (٣ - ٢٤)$$

$$I_2^1 = I_2 . \frac{1}{a} \quad (٣ - ٢٥)$$

$$E_{20}^1 = E_1 \quad (٣ - ٢٦)$$

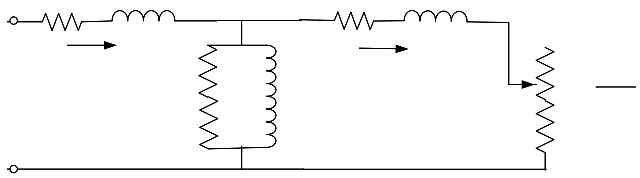
وفي نفس الدائرة المكافئة سوف تقسم المقاومة $\frac{R_2^1}{S}$ إلى مقاومتين مجموعهما $\frac{R_2^1}{S}$ كما يلي

$$\frac{R_2^1}{S} = \frac{R_2^1}{S} + R_2^1 - R_2^1$$

$$= R_2^1 + R_2^1\left(\frac{1}{S} - 1\right)$$

$$\frac{R_2^1}{S} = R_2^1 + R_2^1\left(\frac{1-S}{S}\right) \qquad (٣ - ٢٧)$$

وتوضح هذه الدائرة المكافئة في شكل ٥ (كما هو الحال في حالة المحول مع ملاحظة أن الدائرة المكافئة والقيم بالنسبة لكل وجه)



شكل (٣-٥) الدائرة المكافئة منسوبة لدائرة الابتدائي عند تحميل المحرك

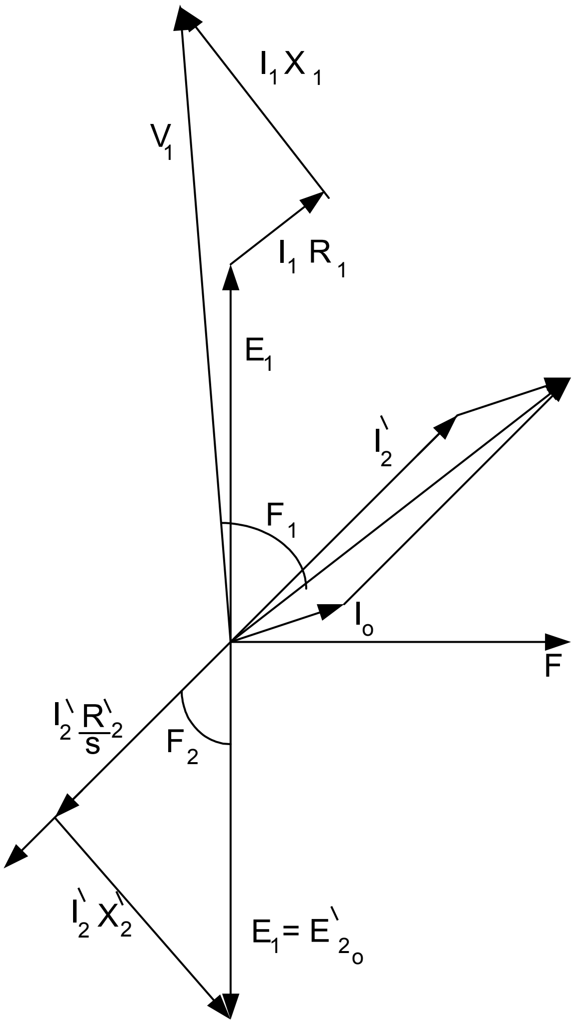
يكون مخطط المتجهات للمحرك عند الدوران كما هو في شكل ٦ حيث

$$I_2^1 = \frac{E_1 = E_{20}^1}{\sqrt{\left(R_2^1/s\right)^2 + \left(X_2^1\right)^2}} \qquad (٣ - ٢٨)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2^1 + I_o \qquad (٣ - ٢٩)$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1\bar{Z}_1$$

$$I_o = \sqrt{I_\mu^2 + I_m^2} \qquad (٣ - ٣٠)$$



شكل (٣ -٦) مخطط المتجهات عند أي معامل انزلاق S

٥,٣- علاقات القدرة في المحرك : Power Relations For I.M.

من الواضح أن القدرة التي يأخذها المحرك من المنبع ويرمز لها بالرمز " P_1 " تتوقف على مقدار الحمل الممثل في التيار ومعامل القدرة وتعطى هذه القدرة بالمعادلة

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos\phi_1 \qquad (٣ - ٣١)$$

حيث V_1 ، I_1 هما الجهد والتيار لكل وجه في الدائرة للعضو الثابت .

وكما هو الموضح من الدائرة المكافئة فإن جزءاً من القدرة الداخلة يفقد في دائرة ملفات العضو الثابت " R_1 " على شكل مفقودات نحاسية والتي تتحول إلى طاقة حرارية وهي

$$P_{cu1} = 3I_1^2 R_1 \qquad (٣ - ٣٢)$$

كما يبدد جزء آخر من القدرة على شكل مفقودات حديدية في الدائرة المغناطيسية للمحرك والتي تمثل في الدائرة المكافئة بالمقاومة R_o التخيلية ويرمز لها بالرمز P_i ومجموع هذه المفاقيد مع المفاقيد النحاسية في ملفات العضو الثابت تسمى بمفاقيد العضو الثابت " P_{st} "

$$P_{st} = P_{cu1} + P_i \qquad (٣ - ٣٣)$$

وعند طرح هذه المفاقيد من قدره المدخل P_1 نحصل على القدرة التي تنسب إلى المجال المغناطيسي الدائر ويطلق عليها باسم قدرة الثغرة الهوائية وتسمى بالقدرة المنقولة من العضو الثابت إلى العضو الدائر وتعطي من المعادلة

$$P_{12} = P_1 - P_{st} \qquad (٣ - ٣٤)$$

وعندما تنتقل القدرة إلى دائرة العضو الدائر فإنه يفقد جزء في صورة مفقودات نحاسية في ملفات العضو الدائر وهي P_{cu2} وتعطي من المعادلة

$$P_{cu2} = 3\bar{I}_2^2 R_2 \qquad (٣ - ٣٥)$$

ويتحول الجزء الباقي من القدرة إلى قدرة ميكانيكية P_m وهي

$$P_m = P_{12} - P_{cu2} \qquad (٣ - ٣٦)$$

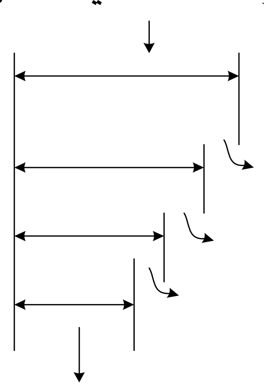
ويطلق على القدرة P_m بالقدرة الميكانيكية الكلية المحولة أو تسمي بالقدرة الميكانيكية المتولدة ويفقد جزء من هذه القدرة في صورة مفاقيد ميكانيكية واحتكاك والجزء الأكبر منها هو الذي يستفاد به كقوة ميكانيكية خارجة أو مستفادة P_2 وتعطي من المعادلة

$$P_2 = P_m - P_F \qquad (٣ - ٣٧)$$

حيث P_F هي القدرة المفقودة في الاحتكاك

ويوضح الشكل (٣ - ٧) شكل أو معدل انسياب القدرة بالنسبة للمحرك ويمكن إيجاد العلاقة بين هذه القدرات كما يلي :

أولاً : القدرة P_{12} يمكن حسابها من الدائرة المكافئة في شكل (٣ - ٥) كما يلي :



شكل (٣ -٧) توزيع القدرة

$$P_{12} = 3I_2^1 E_1 \cos\phi_2 \qquad (٣ - ٣٨)$$

ومن مخطط

$$\cos\phi_2 = \frac{I_2^1 R_2^1 / s}{E_1} \qquad (٣ - ٣٩)$$

وبالتعويض في المعادلة (٣ - ٣٨)

ومنها فإن

$$P_{12} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \qquad (٣ - ٤٠)$$

و بالتعويض من المعادلة (٣ - ٣٥) ، (٣ -٣٦) نجد:

$$P_m = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} - 3I_2^2 R_2$$

$$P_m = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-S)}{S} \qquad (٣ - ٤١)$$

ومن المعادلات ٤٠، ٣٥، ٤١ ، يمكن المقارنة كالآتي :

$$P_{12} \quad : \quad P_m \quad : \quad P_{cu2}$$

$$3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad : \quad 3I_2^2 \frac{R_2}{S}(1-S) \quad : \quad 3I_2^2 R_2 \qquad (٣ - ٤٢)$$

$$1 \quad : \quad 1-S \quad : \quad S$$

ويتضح أن المعامل S الانزلاق يلعب دوراً هاماً جداً في تحديد نسبة فقد النحاس في العضو الدائر والجزء الذي يحول إلى قدرة ميكانيكية ولذلك فإن معامل الانزلاق يجب أن يكون صغيراً لكي يكون معامل الكفاءة عالياً ولذلك تكون S صغيرة وتصل إلى ١٪ في المحركات الكبيرة في بعض الأحيان .

٦,٣ - عزم الدوران Torque

يتولد عزم الدوران الكلي " Total Torque " بواسطة المجال المغناطيسي الدوار بسبب القدرة الحمولة لقدرة ميكانيكية ويعطى العزم من المعادلة

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}} \quad N.m \qquad (٣ - ٤٣)$$

<u>Or</u>

$$T = \frac{P_{12}}{\omega_s} = \frac{P_{12}}{2\pi \frac{ns}{60}} \qquad N.m \qquad (٣ - ٤٤)$$

وبالتعويض عن القدرة P_{12} من المعادلة (٣ - ٣٨)

$$T = \frac{3E_1 I_2 \cos\phi_2}{2\pi \frac{n_s}{60}} \qquad N.m \qquad (٣ - ٤٥)$$

$$I_2^1 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(R_2^1 / s\right)^2 + \left(X_2^1\right)^2}} \qquad (٣ - ٤٦)$$

$$\cos\phi = \frac{R_2 / s}{\sqrt{\left(R_2^1 / s\right)^2 + \left(X_2^1\right)^2}} \qquad (٣ - ٤٧)$$

وبالتعويض من (٣ - ٤٦) ، (٣ - ٤٧) في المعادلة (٣ - ٤٥)

$$T = \frac{3E_1^2 \cdot R_2^1 / s}{2\pi \frac{ns}{60}\left[\left(\frac{R_2^1}{s}\right)^2 + \left(X_2^1\right)^2\right]} \qquad N.m \qquad (٣ - ٤٨)$$

وبفرض أن $\propto = \frac{R_2^1}{X_2^1}$

فإن المعادلة (٣ - ٤٨) يمكن إعادة كتابتها على الصورة

$$T = \frac{3E_1^2}{2\pi \frac{ns}{60} \cdot X_2^1} \times \frac{S \propto}{S^2 + \propto^2} \qquad N.M \qquad (٣ - ٤٩)$$

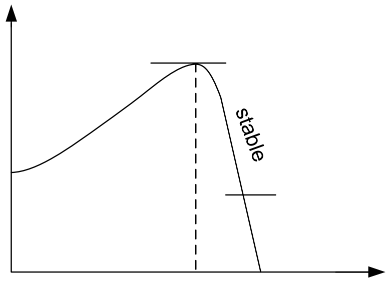
$$T = K_T \times \frac{S \propto}{S^2 + \propto^2} \qquad (٣ - ٥٠)$$

حيث K_T ثابت يعطى من المعادلة

$$K_T = \frac{3E_1^2}{2\pi \frac{ns}{60} \cdot X_2^1} \qquad (٣ - ٥١)$$

ويتضح من المعادلة مدى تأثر وتناسب العزم للمحرك مع معامل الانزلاق S وذلك باعتبار $V_1 \cong E_1$ وهو مقدار ثابت لثبوت الجهد الموصل عليه المحرك .

ويمكن رسم العلاقة التي تحدد العزم مع معامل الانزلاق ويمكن اعتبار أن K_T ، $\propto$ ثابتان كما هو موضح بالشكل٨.



شكل ٨

ويمكننا تغير منحنى العزم وذلك باعتبار $\propto$ متغير حيث يتغير قيمة R_2^1

$$\propto = \frac{R_2^1}{X_2^1}$$

يمكن تغير العزم ويتم هذا التغير بإضافة مقاومات على التوالي في حالة المحركات ذات حلقات الانزلاق ولذلك يستخدم فقط مع المحركات ذات العضو الدائر الملفوف .

ولكي يمكن رسم منحنى عزم الدوران شكل ٨ لأي محرك يجب معرفة قيمتين للعزم هامتين وهما :

١ - عزم بدء الدوران T_{st} والتي عندها $S = 1$ وبالتعويض في المعادلة (٣ - ٥٠)

$$T_{st} = K_T \times \frac{\propto}{1 + \propto^2} \qquad (٣ - ٥٢)$$

٢ - عزم الدوران الأقصى والسرعة التي يحدث عندها $T_{\max}$. وللحصول على هذه القيمة نفاضل معادلة العزم (٣ - ٥٠) بالنسبة للانزلاق وتساوى بالصفر

$$\frac{dT}{dS} = 0 = K_T \frac{\left(S^2 + \propto^2\right)\propto - \propto s0.25}{\left(S^2 + \propto^2\right)^2} \qquad (٣ - ٥١)$$

ومنها فإن القيمة العظمى للعزم تحدث عندها

$$S_m^2 = \propto^2 \qquad (٣ - ٥٢)$$

$$\therefore S_m = \pm \propto \qquad (٣ - ٥٣)$$

وبالتعويض في معادلة العزم (٣ - ٥٠) فإن

$$T_{\max} = K_T \frac{S_m \propto}{S_m^2 + \propto^2} = K_T \times \frac{\propto^2}{\propto^2 + \propto^2}$$

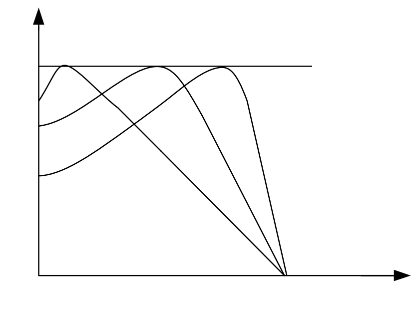
$$T_{\max} = K_T \times \frac{1}{2} \qquad (٣ - ٥٤)$$

وتقسم قيمة العزم الأقصى إلى جزأين الجزء الأول من $n = n_s$ عند اللاحمل وحتى S_m ، T_m عند سرعة $n = n_s \ (1 - S)$ وهذا الجزء يسمى بمنطقة التشغيل المتزن للمحرك " Stable Operation " أما الجزء الثاني فهو من سرعة $n = n_s (1 - S)$ وهي سرعة الوقوف $S = 1$ ، $n = 0$ وتسمى هذه المنطقة منطقة التشغيل غير المتزن أو منطقة التشغيل غير المستقر . " Unstable Operation " .

وجرت العادة على أن يكون عزم الحمل الكامل عند التصميم في حدود نصف العزم الأقصى

$$T_{F \cdot L} = \frac{1}{2} T_{\max}$$

ويجب أن يكون عزم الحمل الكامل أقل من عزم بدأ الدوران حتى يستطيع المحرك أن يبدأ حركته والحمل محمل عليه ويمكن أيضاً التحكم في عزم البدء حسب الطلب حيث يتحكم فيه عن طريق تغيير المقاومة المضافة لملفات العضو الدائر الملفوف ويوضح شكل (٣ - ٩) تغير منحنى العزم مع تغيير R_2^1 .



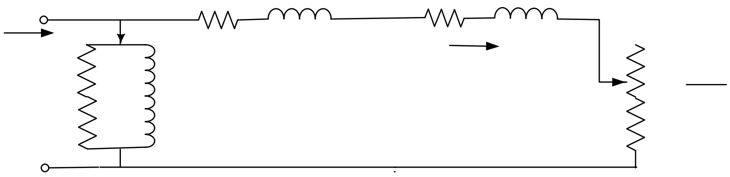
شكل (٣ -٩)

ملاحظة :

بتغيير مقاومة ملفات العضو الدائر تتغير فيه ∝ وبالتالي عزم بدأ الدوران وفيه السرعة التي يحدث عندها العزم الأقصى مع ثبوت قيمة العزم الأقصى دون تغيير وذلك لأن من المعادلة (٣ - ٥٤) نجد أن العزم الأقصى ثابت لا يتأثر بقيمة R_2^1 .

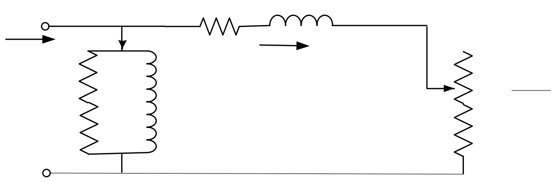
٧,٣ - الدائرة المكافئة للمحرك الثلاثي الأوجه : -

سبق ووضحنا في شكل ٥ الدائرة المكافئة لكل وجه للمحرك الثلاثي الأوجه . ويمكن تبسيط هذه الدائرة بدائرة أخرى تقريبية وذلك بنقل الدائرة الممثلة للدائرة المغناطيسية إلى ناحية جهد الابتدائي V كما في شكل (٣ - ١٠) والذي يحتوى على دائرة مكافئة متصلة .



شكل (٣ -١٠) الدائرة المكافئة التقريبية

ويمكن تبسيط هذه الدائرة أكثر كما في شكل (٣ - ١١)



شكل (٣ -١١)

حيث

$$R_{eq} = R_1 + R_2^1$$

$$= R_1 + R_2\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \qquad (٣ - ٥٥)$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2^1$$

$$= X_1 + X_2\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \qquad (٣ - ٥٦)$$

ويمكن هذا التبسيط الوصول إلى دائرة مكافئة تقريبية تشبه إلى حد كبير تلك التي في المحول فيما عدا المقاومة $R_2^1\frac{(1-s)}{s}$ والتي يمكن تشبيهها بالحمل وتكون القدرة المفقودة فيها هي القدرة الميكانيكية المتولدة .

٨,٣ - تعيين ثوابت الدائرة المكافئة من تجارب المحرك

كما سبق دراسته في المحولات الكهربية يمكن تعيين ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية وذلك بإجراء تجارب على المحركات .

أ - تجربة اللاحمل No-load Test

بمراجعة الدائرة المكافئة التقريبية شكل (٣ - ١١) فإن معنى لاحمل يعني أن المقاومة على العضو الدائر = ما لا نهاية .

وهذا معناه أن $S = 0$ أو صغيرة جداً وهذا يحدث فقط عندما يدور المحرك عند سرعة = سرعة التزامن أو قريبة جداً منها التي يمكن أن تعتبر دائرة المحرك المكافئة دائرة مفتوحة عند هذه السرعة .

ويوصل المحرك في هذه الحالة إلى منبع التشغيل العادي أو جهد المحرك المقنن ثم يوصل معه أجهزة لقياس الجهد – التيار – القدرة وتسمى هذه القراءات بقراءات اللاحمل عندما تكون السرعة هي سرعة التزامن أو قريبة جدا منها حيث إن القدرة باستخدام واتميتران تكون:

$$P_o = W_1 + W_2$$

ويمكن من نتائج هذه التجربة تحديد مكونات الدائرة المغناطيسية كما يلي مع مراعاة أن قيم الجهد والتيار للوجه .

$$P_o = 3V_o I_o \cos\phi_o \qquad (٣ - ٥٧)$$

$$\therefore \cos\phi_o = \frac{P_o}{3V_o I_o} \quad (٣ - ٥٨)$$

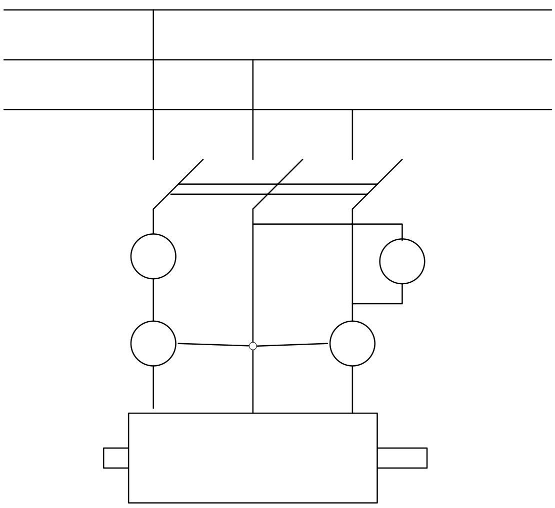
$$I_\eta = I_o \cos\phi_o \quad (٣ - ٥٩)$$

$$I_m = I_o \sin\phi_o \quad (٣ - ٦٠)$$

ومنها

$$\therefore R_o = \frac{V_o}{I_\mu} \quad (٣ - ٦١)$$

$$X_o = \frac{V_o}{I_m} \quad (٣ - ٦٢)$$



شكل (٣ -١٢)

ملاحظة :

يدار المحرك في هذه الحالة عند اللاحمل أي عند سرعة قريبة من سرعة التزامن أو تدار بآلة خارجية عند سرعة التزامن نفسها وفي هذه الحالة الأخيرة تكون القدرة هي قدرة المفاقيد الحديدية .

عند دوران المحرك عند اللاحمل فإن القدرة المقاسة تحتوي على مفاقيد نحاسية في ملفات العضو الثابت نتيجة لمرور تيار اللاحمل وجزء آخر كمفاقيد احتكاك ولكن هذه المفاقيد صغيرة يمكن إهمالها ونعتبر أن القدرة المقاسة تقريباً هي المفقودات الحديدية .

ب - تجربة القصر Short Circuit Test

يسمى هذا الاختبار في بعض الأحيان باختبار العضو الدائر المسوك أو الممنوع من الحركة " Blocked Rotor Test " وذلك لأن بالنظر إلى الدائرة المكافئة التقريبية شكل (٣ - ١١) فإن القصر معناه أن المقاومة

$$R_2^1 \frac{(1-S)}{S} = 0$$

و هذا الشرط يتحقق عندما تكون $S = 1$ وهذا معناه الدائرة مقصورة في حالة ما يكون العضو الدائر في حالة سكون $n = 0$.

وعلى ذلك فإن تجربة القصر تجرى على المحرك وهو ممنوع من الحركة ويتم ذلك بربطه بفرملة ميكانيكية . وحيث إن المقاومة في دائرة العضو الدائر تساوي صفراً تقريباً.

فإن توصيل المحرك على الجهد المقنن سوف يتسبب في مرور تيار كبير جداً قد يتلف الملفات للمحرك . ولذلك تستخدم جهداً منخفضاً – بحيث يراعى أن يكون تيار القصر مساويا تيار الحمل الكامل للمحرك. وتوصل الدائرة كما في شكل (٣ - ١٢) ومن قراءات هذه التجربة تحسب R_{eq} ، X_{eq} كما يلي حيث

$$P_{s\cdot c} = 3I^2_{s\cdot cph} \cdot R_{eq} \qquad (٣ - ٦٣)$$

وجميع القيم للوجه الواحد

$$\therefore R_{eq} = \frac{P_{s\cdot c}}{3I^2_{s\cdot c\,ph}} \qquad (٣ - ٦٤)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{s\cdot c}}{I_{s\cdot c}} \qquad (٣ - ٦٥)$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R^2_{eq} + X^2_{eq}}$$

$$\therefore X_{eq} = \sqrt{Z^2_{eq} - R^2_{eq}} \qquad (٣ - ٦٦)$$

وبذلك أمكن تحديد المعلومات أو بيانات أو مكونات الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك من تجربتي اللاحمل والقصر وكذلك أمكن تحديد قيمة كل من المفاقيد الثابتة والأخرى المتغيرة P_o ، $P_{s.c}$ والتي تحسب على أساسها كفاءة المحرك أو جودته حيث

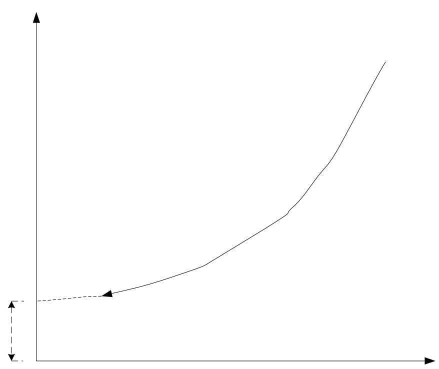
$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_{s \cdot c}} \times 100 \qquad (٣ - ٦٧)$$

ويجب ملاحظة أن تكون المفاقيد المتغيرة محسوبة عند الحمل الذي تحسب عنده الكفاءة أو تضرب في مربع نسبة الحمل حيث تتناسب مع مربع التيار .

ج - تعيين مفاقيد الاحتكاك

تجرى تجربة اللاحمل عادي عند الجهد الكامل وتقاس القدرة الداخلة للمحرك والسرعة . ثم ينقص جهد المنبع وتكرر القياسات هكذا حتى نجد أن السرعة بدأت في الانخفاض نوقف القياس ونرسم العلاقة بين القدرة والجهد كما هو موضح بالشكل ثم نمد المنحنى حتى تتقاطع مع الرأسي فيتحدد قيمة القدرة المفقودة في الاحتكاك P_F وذلك عند جهد يساوي صفراً أي أنه لا وجود لمفاقيد حديدية ولا نحاسية .



٩,٣ - أمثلة محلوله :

مثال ١ :

محرك تأثيري (حثي) ٦٠ c /s أربعة أقطاب سرعته عند الحمل الكامل ١٧٤٠ r.p.m

احسب سرعة الانزلاق ومعامل الانزلاق عند الحمل الكامل.

الحل :

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 60}{2} = 1800 \quad rpm$$

$$n = 1740 \quad rpm$$

سرعة الانزلاق $\Delta n = n_s - n$

$$= 1800 - 1740 = 60 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s}$$

$$= \frac{60}{1800} = 0.033$$

$$= 3.3\%$$

مثال ٢

محرك تأثيري ٦ أقطاب تردده ٥٠ c/s القوة الدافعة الكهربية في العضو الدائر لها تردد ٢,٥ c/s احسب معامل الانزلاق وكذلك سرعة العضو الدوار .

الحل :

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{2.5}{50} = 0.05$$

$$n = n_s(1 - S)$$

$$n_s = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$n = 1000 \times (1 - 0.05)$$

$$= 950 \quad rpm$$

مثال ٣

محرك تأثيري ثلاثي الوجه ٦ أقطاب ٤٤٠v ، ٥٠ c/s القدرة الداخلة إلى العضو الدائر Kw ٨٠ تردد العضو الدائر ١٠٠ c /m (ذبذبة/دقيقة) احسب :

أ - الانزلاق ب - سرعة لعضو الدائر

ج - القدرة الميكانيكية المتولدة د - القدرة المفقودة في ملفات العضو الدائر (المفاقيد النحاسية)

هـ - مقاومة ملفات العضو الدائر لكل وجه إذا كان تيار العضو الدائر ٦٥ أمبير.

الحل :

$$S = \frac{f_2}{f_1} = \frac{100}{60 \times 50} = 0.033$$

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$n = n_2(1-S)$$

$$= 1000 \times (1-0.033) = 967 \quad rpm$$

$$P_{cu2} = sP_{12} = 0.033 \times 80$$

$$= 2.67 \quad Kw$$

$$P_m = 80 - 2.67 = 77.33 \quad Kw$$

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2$$

$$\therefore R_2 = \frac{P_{cu2}}{3I_2^2} = \frac{2.67 \times 10^3}{3 \times (65)^2} \cong 0.2 \quad \Omega$$

مثال ٤

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه ذو سرعة تزامن ١٠٠٠ r.p.m يعطي قدرة ميكانيكية مقدارها ٥hp (حصان) عند سرعة ٩٣٥ r.p.m

احسب قدرة المدخل لهذا المحرك إذا كانت مفقودات العضو الثابت ٤٠٠ w .

الحل :

$$P_m = 5 \times 746 = 3730 \quad W$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 935}{1000} = 0.065$$

$$P_m = P_{12}(1 - S)$$

$$\therefore P_{12} = \frac{P_m}{1 - s} = \frac{3730}{1 - 0.065} = \frac{3730}{0.935}$$

$$= 3990 \quad W$$

$$\therefore P_1 = P_{12} + P_{st}$$

$$= 3990 + 400 = 4390W$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_1} = \frac{3730}{4390} = 0.85$$

مثال ٥ :

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه يعمل على جهد v٥٠٠ وتردد ٥٠ c/s ولد ٦ أقطاب يعطي قدرة ميكانيكية فرملية hp٢٠ عند سرعة r.p.m٩٥٠ وعندما يكون معامل القدرة ٠,٨٦ والمفقودات الميكانيكية ١ hp

احسب عند الحمل الكامل :

أ - معامل الانزلاق ب - مفقودات النحاس في العضو الدائر

ج – قدرة المدخل للمحرك علماً بأن المفقودات في العضو الثابت هي W١٥٠٠

د - تيار الخط الداخل للمحرك .

الحل :

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \quad rpm$$

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{50}{1000} = 0.05$$

$$P_2 = 20 \times 746 = 14920 \quad W$$

$$P_m = P_2 + P_f = 21 \times 746 = 15666 \qquad W$$

$$P_{12} = \frac{P_m}{1-s} = \frac{15666}{0.95} = 16500 \qquad W$$

$$\therefore P_1 = P_{12} + P_{st}$$

$$= 16500 + 1500 = 18000 \qquad W$$

$$P_{cu2} = sP_{12} = 0.05 \times 16500 = 825 \qquad W$$

$$P = \sqrt{3} VI \cos\phi$$

$$\therefore I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos\phi} = \frac{18000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0.86} = 24.15 \qquad A$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{14920}{18000} = 0.83$$

مثال ٦ :

قدرة المدخل لمحرك تأثيري ثلاثي الأوجه هي ٤٠Kw عندما يكون دائراً بسرعة ٩٧٥ r.p.m وينبع على منبع جهده ٥٠٠ v وتردد ٥٠ c/s فإذا كان المحرك له ٦ أقطاب ومفقودات العضو الثابت ١ Kw والمفقودات الميكانيكية ٢ Kw احسب عند الحمل الكامل

أ - معامل الانزلاق ب - القدرة الميكانيكية بالحصان الفرملي

ج - مفقودات النحاس في العضو الدائر د - معامل الكفاءة (الجودة) للمحرك

الحل

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \qquad rpm$$

أ -

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000-975}{1000} = 0.025 \qquad 2.5\%$$

$$P_{12} = P_1 - P_{st}$$

$$= 40 - 1 = 39 \qquad Kw$$

ج - $P_{cu2} = sP_{12} = 0.025 \times 39 = 0.975$

$$P_m = P_{12} - P_{cu2}$$
$$= 39 - 0.975 = 38.025 \quad Kw$$
$$P_2 = P_m - P_f$$
$$= 38.025 - 2 = 36.025$$

ب - $P_2(hp) = \frac{36025}{746} \cong 50 \quad hP$ بالحصان

ء - $\eta = \frac{36.025}{40} = 0.90 \qquad 90\%$

مثال ٧:

محرك تأثيري ثلاثي المراحل موصل نجمة له ٢٤ pole يعمل على منبع جهده ٣٠٠٠V وتردده ٥٠ c/s . العضو الدائر الملفوف مقاومة مادية ٠,٠١٦ أوم وممانعة حثيه في حالة السكون ٠,٢٦٥ أوم لكل وجه . يحصل من هذا المحرك على عزم دوران الحمل الكامل عندما يكون دائر بسرعة ٢٤٧ r.p.m احسب النسبة بين النهاية العظمى لعزم الدوران و عزم دوران الحمل الكامل وكذلك السرعة التي يحدث عندها العزم الأقصى $T_{\max}$.

الحل :

$2P = 24 \quad Poles \qquad f = 50 \quad c/s$

$R_2 = 0.016 \quad \Omega \qquad X_2 = 0.265 \quad \Omega \qquad n = 247$

$$n_s = \frac{60f}{P} = \frac{60 \times 50}{12} = 250 \quad rpm$$
$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{250 - 247}{250} = 0.012$$
$$S_{f \cdot l} = 1.2\%$$
$$T_{f \cdot l} = K_T \frac{\propto S_{f \cdot l}}{\propto^2 + S_{f \cdot l}^2}$$

$$T_{\max} = K_T \cdot \frac{1}{2}$$

$$\frac{T_{\max}}{T_{f\cdot l}} = \frac{K_T \cdot \frac{1}{2}}{K_T \cdot \frac{\propto S_{f\cdot l}}{\propto^2 + S_{f\cdot l}^2}} = \frac{\propto^2 + S_{f\cdot l}^2}{2 \propto S_{f\cdot l}}$$

$$\propto = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0.016}{0.265} = 0.06$$

$$= \frac{(0.06)^2 + (0.012)^2}{2 \times 0.06 \times 0.012} \cong 2.5$$

السرعة عند العزم الأقصى $n_m = n_s(1 - S_m)$

$$= 250 \times (1 - 0.06)$$

$$= 235 \quad rpm$$

ما هي قيمة المقاومة الخارجية اللازم توصيلها للحصول على أعلى عزم في البداية ؟

$$\propto = 1 = S_{\max}$$

$$\therefore \frac{R_2 + R_{ext}}{X_2} = 1$$

$$R_2 + R_{ext} = X_2$$

$$R_{ext} = X_2 - R_2$$

$$= 0.265 - 0.016$$

$$= 0.249$$

مثال ٨ :

محرك تأثيري ثلاثي الأوجه ثمانية أقطاب ٦٠٠ hp ، ٥٠ c/s اختبر فأعطى النتائج الآتية : -

اللاحمل : w٢٠٠٠٠ ، A ١٤ ، v٦٠٠٠

القصر : w٣٠٥٠٠ ، A ٧٠ ، v١٠٠٠

مقاومة العضو الثابت $R_1 = R_2^1$ ونسبة التحويل $\frac{N_1}{N_2} = 4$. احسب مكونات الدائرة المكافئة لهذا المحرك إذا كانت $X_1 = X_{20}^1$ والمحرك موصل دلتا .

الحل :

تجربة اللاحمل

$$P_o = \sqrt{3} V_1 I_1 \cos\phi_o$$

$$\therefore \cos\phi_o = \frac{20000}{\sqrt{3}\times 6000\times 14} = 0.138$$

$$\therefore \phi_o = 82.07 \qquad \therefore \sin\phi_o = 0.99$$

$$I_\mu = I_o \cos\phi_o = \frac{14}{\sqrt{3}}\times 0.138 = 1.12 \quad Amp$$

$$I_m = I_o \sin\phi_o = \frac{14}{\sqrt{3}}\times 0.99 = 8 \quad Amp$$

$$R_o = \frac{V}{I_\mu} = \frac{6000}{1.12} = 5357 \quad \Omega$$

$$X_o = \frac{V}{I_\mu} = \frac{6000}{8} = 750 \quad \Omega$$

تجربة القصر

$$Z = \frac{V}{I_2} = \frac{1000}{\frac{70}{\sqrt{3}}} = 24.7 \quad \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{30500}{3\times\left(\frac{70}{\sqrt{3}}\right)^2} = 6.22 \quad \Omega$$

$$\therefore X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{(24.7)^2 - (6.22)^2} = 23.94 \quad \Omega$$

$$\therefore R_1 = R_2^1 = \frac{R_{eq}}{2} = 3.11 \quad \Omega$$

$$X_1 = X_2^1 = \frac{X_{eq}}{2} = \frac{23.94}{2} = 11.97 \quad \Omega$$

$$X_2 = \frac{X_2^1}{a^2} = \frac{11.97}{(4)^2} = 0.748 \quad \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_2^1}{a^2} = \frac{3.11}{(4)^2} = 0.194 \quad \Omega$$

١٠,٣ - طرق بدأ حركة المحركات التأثيرية :

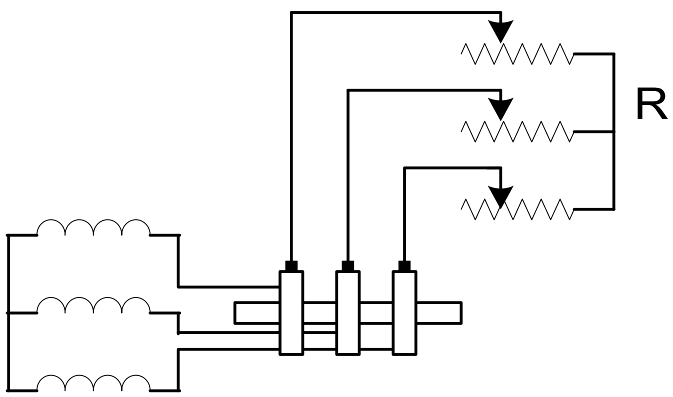
اتضح من الدراسة السابقة أن تيار البدء يتناسب طردياً مع الجهد وعكسياً مع المعاوقة للدائرة المكافئة للمحرك الذي سبق بيانها . وعندما يوصل المحرك مباشرة بالمنبع يسحب تيار هو تيار القصر عند البدء وقيمة هذا التيار كبيرة عدة مرات تيار الحمل الكامل للمحرك ويعتبر المحرك في حالة القصر حيث إن $S=1$ وعلى ذلك فإن $Z_2 = R_2 + JX_2$

ولذلك لابد من طريقة تستخدم عند بدء تشغيل المحرك لتقليل هذا التيار ونذكر منها الطرق الآتية :

المحركات ذات العضو الدائر الملفوف باستخدام مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الدائر يحد استخدام هذه المقاومة من تيار بدء التشغيل لكل وجه إلى قيمة تتوقف على قيمة المقاومة التي توصل على التوالي مع ملفات كل وجه شكل (٣ - ١٣) . وتقل التيار وفقاً للمعادلة الآتية

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + R_2^1 + R_{st}\right)^2 + \left(X_1 + X_2^1\right)^2}} \qquad (٣ - ٦٨)$$

وبزيادة المقاومة في العضو الدائر فإن العزم يزيد نظراً لأن



شكل (٣ -١٣)

$$\propto = \frac{R_2 + R_{st}}{X_{20}} \qquad (٣ - ٦٩)$$

وبزيادة $\propto$ معناها زيادة عزم الدوران عند البدء ويمكن الحصول على عزم الدوران الأعظم عند البدء إذا تحقق شرط

$$S_m = 1 = \propto = \frac{R_2^1 + R_{st}}{X_{20}^1} \qquad (٣ - ٧٠)$$

أي إذا كانت المقاومة المضافة تعطى بالمعادلة

$$R_{st} = X_2^1 - R_2^1 \qquad (٣ - ٧١)$$

والتي عندها $S_m = 1 = \propto$

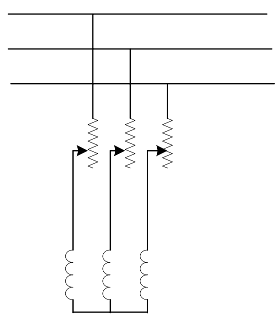
والسبب في زيادة العزم في هذه الحالة رغم نقصان التيار هو زيادة معامل القدرة عند بدأ التشغيل .
وبعد أن تصل سرعة المحرك إلى قرب سرعته المعتادة تفصل هذه المقاومة لبدأ الحركة تدريجياً إلى أن تخرج كاملة من الدائرة لأن وجودها يسبب زيادة المفاقيد عند التحميل ونقصان الجودة أو الكفاءة بدون داعٍ .

طرق بدأ حركة المحرك ذو القفص السنجابي (أو العضو الملفوف) :

ويتم بدأ الحركة لمحركات القفص السنجابي (أو العضو الدائر الملفوف) بإحدى الطرق الآتية :

١ - وضع مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الثابت

توضع مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الثابت بحيث يمكن خفض قيمة الجهد الموصل إلى الملفات ، ويلاحظ وجود مفاقيد في مقاومة البدء في هذه الحالة مما يجعل هذه الطريقة غير مناسبة للاستخدام .
ويوضح شكل ١٤ توضيح هذه الطريقة



شكل (٣ -١٤)

٢ - استخدام المحول الذاتي **Auto Transformer**

يوصل المحرك عند البدء إلى محول أوتو (ذاتي) ثلاثي الوجه ويصل إلى ملفات العضو الثابت جزء من جهد المنبع الكلي يتناسب مع التيار المسموح بمروره عند البدء . وبعد أن يصل المحرك إلى السرعة المطلوبة يغير وضع المفتاح إلى التشغيل العادي على المنبع مباشرة وبذلك يتم فصل المحول الذاتي تماماً وذلك لتوفير تشغيله للبدء فقط.

٣ - استخدام مفتاح التحويل نجمة/ دلتا **Star/ Delta Switch**

تستخدم هذه الطريقة مع المحركات التي على توصيلة دلتا في حالة التشغيل العادي ونتيجة للتوصيل نجمة ينخفض الجهد إلى $\frac{1}{\sqrt{3}}$ وينخفض تيار الخط إلى $\frac{1}{3}$ التيار الذي يمر في حالة الدلتا وبعد أن تصل السرعة إلى السرعة العادية يفصل من توصيله النجمة ويوصل دلتا .

١١،٣ - طرق التحكم في سرعة المحرك التأثيري :

يوصف المحرك التأثيري ثلاثي الأوجه بأنه يدور بسرعة ثابتة تقريباً ، فسرعة المحرك في حالة اللاحمل تختلف اختلافاً طفيفاً جداً من سرعة التزامن كما سبق أن بينا من ذي قبل وتنخفض السرعة انخفاضاً صغيراً عند التحميل وهذا النقص يتناسب مع معامل الانزلاق وذلك من مميزات هذا النوع من المحركات أما التحكم في السرعة فقد وجد بعض الطرق للتحكم فيها ومن أهمها :

١،١١،٣ - استخدام مقاومة على التوالي مع ملفات العضو الدائر الملفوف :

تستخدم هذه الطريقة بطبيعة الحال مع المحركات ذات حلقات الانزلاق حيث توضع مقاومة متغيرة على التوالي مع ملفات العضو الدائر ، بتغير قيمتها فيمكن تغيير سرعة المحرك . باعتبار أن قدرة المدخل للثغرة الهوائية P_{12} وبالتالي قدرة المدخل للمحرك ثابتة على وجه التقريب . فإذا تغيرت مقاومة العضو الدائر فإن P_{cu2} تتغير مما ينشأ عنه تغيير في النسبة $\frac{S}{1-S}$ أو بمعنى أصح في معامل الانزلاق مما ينشأ عنه تغيير في السرعة .

وتستخدم هذه الطريقة في حالة تنظيم السرعة في حدود ١٠ ٪ - ١٥ ٪ من السرعة المقننة فقط وذلك لأن استخدام مقاومة مع ملفات العضو الدائر تبدد جزء من الطاقة الكهربية الداخلة للمحرك في صورة مفاقيد نحاسية .

٢,١١,٣ - تغير السرعة في المحركات ذات القفص السنجابي :

بتخفيض جهد المنبع :

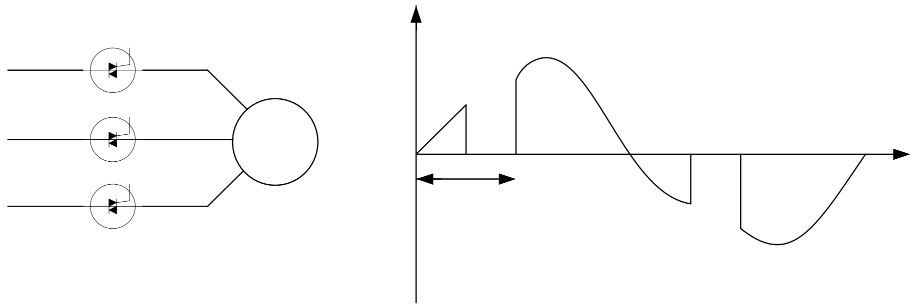
ويتم ذلك باستخدام عدة وسائل منها : -

بتوصيل مقاومة متغيرة بالتوالي مع المنبع .

بتوصيل ممانعة متغيرة بالتوالي مع المنبع كما هو الحال في مفتاح تشغيل المراوح الكهربية .

بتوصيل محول ذاتي بالتوالي مع المنبع .

باستخدام الجوامد (الترياك أو الثايريستور) .



شكل B　　　　شكل C

واستخدام الترياك أصبح شائع الاستعمال لرخص تكاليفه وخفه وزنه وقلة المفاقيد الكهربية . ومن عيوبه توليد التوافقيات في التيار والجهد (Harmonics) وهذا يؤدي إلى توليد العزم المتردد وبعض المفاقيد الكهربية ، والعزم المتردد يسبب بعض الاهتزازات والضوضاء ، وبالرغم من ذلك مزايا الترياك أكثر من عيوبه .

وطريقة تخفيض جهد المنبع عموماً تستخدم في الأحمال الخفيفة والتي لا تحتاج لعزم بدء مرتفع مثل المراوح الكهربية ، ومنحنى العزم مع السرعة عند جهد منبع مختلف مبين في شكل A .

ب - بتغيير عدد الأقطاب

بمراجعة المعادلة

$$n_s = \frac{60f}{P}$$

حيث إن n_s السرعة المتزامنة - f التردد ذبذبة/ثانية - P عدد أزواج الأقطاب .

ويمكن تغيير السرعة للعضو الدائر $n \cong n_s$ عن طريق تغيير التردد أو تغيير عدد الأقطاب .

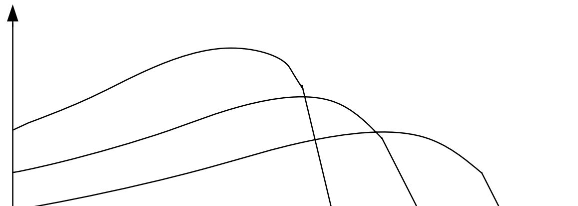
في حالة تغيير عدد الأقطاب ويتم ذلك عن طريق تغيير طريقة توصيل الملفات من عدد معين من الأقطاب إلى النصف أو الضعف ويطلق على هذا الأسلوب أو الطريقة في تغيير التوصيلات اسم (توصيلات دالندر)
" Dahalander Connection " .

ويوضح الشكل طريقة تغيير عدد الأقطاب مرة ثمانية أقطاب ومرة أخرى أربعة أقطاب . وهذا معناه أن السرعة تتغير إلى حالتين فقط .

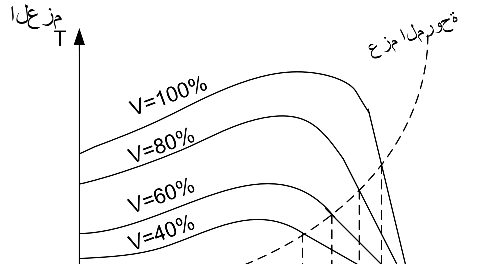
ج – بتغيير التردد

في حالة تغيير التردد فإنه كان يستخدم مولد خاص ذات تردد يمكن التحكم فيه ويتغير التردد فيمكن الحصول على سرعات مختلفة . ولكن حالياً تستخدم الجوامد مثل موحد وعاكس (Converter Inverter) ، الموحد يحول التيار المتردد إلى مستمر وجهد مختلف والعاكس يحول التيار المستمر إلى متردد بتردد مختلف وذلك بالتحكم في زمن الدورة T حيث التردد $f = \frac{1}{T}$ وهذه الطريقة يمكن التحكم في الجهد والتردد معاً وهذا يساعد على تثبيت النسبة $\frac{V}{f}$ ثابتة للمحافظة على عزم ثابت .

وعلاقة العزم والسرعة في حالة تغير التردد موضحة بالشكل D حيث تتغير موضع n_s .



شكل ج تغير السرعة مع الجهد



شكل د تغير السرعة مع التردد

كلما زاد التردد زادت السرعة .

١٢,٣ - تشغيل المحرك الثلاثي الأوجه على تردد يختلف عن تردده الأصلي :

أ - أن الترددين الشائع استخدامهما في العالم في التيار المتغير هما ٥٠ ذبذبة/ثانية ، ٦٠ ذبذبة/ثانية . وقد يلزم اتخاذ بعض الإجراءات عند استخدام آلة على تردد مختلف .

بالنسبة للمحركات التي تصمم على ٦٠ ذبذبة وتستخدم على تردد ٥٠ ذبذبة فهي الحالة الأبسط حيث إن $E_1 = 4.44 f_1 \phi_m N_1$

فإذا اعتبرنا أن جهد المنبع $E_1 = V_1$ فإن استخدام ٥٠ ذبذبة بدلاً من ٦٠ ذبذبة يلزم تخفيض الجهد بنفس النسبة أي استخدام ١٠٠ فولت بدلاً من ١١٥ فولت للتأكد من سلامة المحرك . ويمكن أن يتم ذلك عن طريق استخدام محول أوتو (محول ذاتي) معد خصيصاً لهذا الغرض .

ب -في حالة تشغيل محرك مصمم على ٥٠ ذبذبة على تردد ٦٠ ذبذبة حيث تزيد قدرة المدخل للمحرك ويزداد معامل القدرة وتؤدى عموماً إلى نقص في قيمة كثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية ويسحب تياراً أكبر بناء على ذلك .

وكذلك نتيجة لزيادة السرعة من $n_s = \frac{60 \times 50}{P}$ إلى $\frac{60 \times 60}{P}$ فإن هذا يعادل عن طريق زيادة القدرة بزيادة جهد المنبع وذلك للمحافظة على العزم أو الحمل الثابت حيث $T = \frac{P}{\omega}$.

الآلات التوافقية (التزامنية)
Synchronous Machines

١,٤ - المقدمة والتركيب :

يتم توليد معظم الطاقة الكهربية المستخدمة في الحياة العملية عن طريق المولدات المتزامنة الثلاثية الوجه ولذلك سوف نركز في هذا الباب عليها . أما المولدات الأحادية الوجه فتستخدم في حالات خاصة . ومن البديهي أن تدور هذه الآلة بسرعة ثابتة وهي سرعة التزامن أو التوافق Synchronous Speed وتتوقف هذه السرعة على الآلة المحركة للمولد ولكن لابد أن تكون ثابتة حتى نحصل على قوة دافعة كهربية ذات تردد ثابت حيث يرتبط التردد والسرعة وعدد الأقطاب بالعلاقة

$$f = \frac{pn_s}{60} \qquad (٤ - ١)$$

حيث n_s هي سرعة التزامن لفة/دقيقة

P عدد أزواج الأقطاب

f هو التردد ذبذبة /ثانية

فمثلاً للحصول على تردد ٥٠ ذبذبة/ثانية . فإن السرعة يجب أن تكون ٣٠٠٠ ، ١٥٠٠ ، ١٠٠٠ لعدد الأقطاب ٢، ٤ ، ٦ على الترتيب .

وتختلف السرعة وفقاً لنوع الآلة المديرة فمثلاً في المحطات المائية تكون السرعة منخفضة وتستخدم السرعات العالية في حالة المحطات البخارية أو الغازية وعموماً فإن المهم هو ثبوت السرعة حتى نحصل على تردد ثابت على الدوام . وفي الآلات المتزامنة يمثل المنتج العضو الثابت للآلة عادة (Stator) على عكس ما هو مألوف في آلات التيار المستمر حيث يكون المنتج هو العضو الدائر . ويحتوى المنتج على عدد معين من المجاري (S) وهي التي ترتب فيها الملفات الكلية للآلة N_t وتعطى من

$$N_t = \frac{Z}{2} \qquad (٤ - ٢)$$

حيث Z هي عدد الموصلات الكلية على المنتج

وإذا فرضنا أن عدد الملفات C فإن :

$$C = \frac{N_t}{N} = \frac{Z}{2N} \qquad (٤ - ٣)$$

حيث N عدد لفات الملف الواحد

ويمكن أن تكون الملفات أحادية الطبقة أى يوجد بكل مجرى جانب ملف أو تكون مزدوجة الطبقة أى تحتوى كل مجرى على جانبين ملفين مختلفين .

أما الأقطاب فعادة تكون على العضو الدائر في الآلات المتزامنة وهي أحد نوعين :

١ - أقطاب بارزة : Salient Pole

وتكون فيها الثغرة الهوائية بين العضو الثابت والدائر غير منتظمة وتشبه أقطاب آلة التيار المستمر .

٢ - أقطاب غير بارزة (أسطوانية) : Non Salient Pole

وتكون فيها الثغرة الهوائية ثابتة وشكل العضو الدائر أسطواني كما في حالة المحرك الاستنتاجي .

ويختلف النوعين من حيث المنتجات والخواص والممانعة المغناطيسية للثغرة الهوائية وكذلك طريقة حساب التنظيم في الجهد لكل نوع .

٢,٤ - ملفات المنتج في آلات التيار المتغير :

تتكون ملفات المنتج من ملفات ثلاثية الأوجه (المراحل) (٣ Phase) لذلك فإن المجاري تنقسم إلى ثلاثة أجزاء بحيث يخص كل وجه نفس العدد من المجاري وبالتالي من الملفات تحت كل قطب من أقطاب الآلة البالغ عددها " $2P$ " فإذا رمزنا لعدد المجاري لكل وجه تحت كل قطب بالرمز q فإن

$$q = \frac{S}{3 \times 2P} \qquad (٤ - ٤)$$

وكذلك عدد لفات كل وجه T_{ph} تعطي

$$T_{ph} = \frac{Z}{2 \times 3} = \frac{N_t}{3} \qquad (٤ - ٥)$$

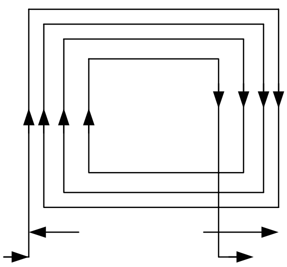
ومن واقع التوزيع الفراغي لكثافة الخطوط المغناطيسية عبارة عن منحنى جيبي على مدى الخطوة القطبية بحيث تكون قيمة الكثافة في نهايتها العظمى عند منتصف القطب وصفراً عند خط التعادل بين كل قطبين . وبناء على ذلك فإن القوة الدافعة الكهربية المتولدة في جوانب الملفات تختلف عن بعضها البعض مرحلياً على موقعها في المجاري .

ويجب أن تكون المسافة بين بداية ونهاية الملف نفسه هي خطوه قطبية أي ١٨٠ درجة كهربية بقدر الإمكان . كما يجب أن تكون الزاوية بين الأوجه ١٢٠ درجة كهربية .

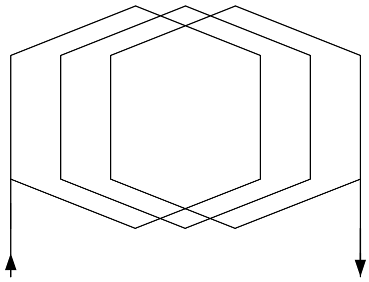
ويمكن تقسيم الملف إلى نوعين أساسيين من أنواع الملفات وهما :

أ - الملفات المتمركزة : Concentric Coils

تكون الملفات في هذه الحالة مستطيلة الشكل ويكون اتساع الملفات مختلفاً بالنسبة لملفات المجموعة الواحدة بشرط أن يكون الاتساع بالنسبة للمجموعة بأكملها هو الاتساع المطلوب أي خطوة قطبية كاملة كما في الشكل (٤ - ١)



شكل (٤ -١) لف متمركز



شكل (٤ -٢) لف شبكي

ب - الملفات الشبكية :

وهذه الملفات تشبه ملفات آلة التيار المستمر وتكون الملفات ذات اتساع واحد ومتماثلة في الشكل كما في شكل ٢ .

ثم توصل بعد ذلك الملفات مع بعضها بطريقة ما بحيث تتصل ملفات كل وجه على التوالي مع بعضها بحيث تتفق مع أقطاب الآلة . ثم توصل الأوجه مع بعضها بطريقة دلتا (Δ) أو النجمة (γ) كآلة ثلاثية الوجه . مع ملاحظة أن طريقة توزيع الملفات تؤثر في قيمة القوة الدافعة الكهربية المستنتجة في ملفات المولد . وفي بعض الحالات قد تنفصل ملفات كل وجه في أكثر من دائرة واحدة أو في عدد من دوائر التوازي يتوقف على قيمة التيار لكل وجه يكون المسار الواحد I_C .

$$I_c = \frac{I_a}{2a}$$

حيث $2a$ عدد دوائر التوازي لكل وجه . مع ملاحظة أن تكون القوة الدافعة الكهربية المستنتجة لكل وجه متساوية تماماً.

مثال : منتج مولد تيار متغير يحتوى على ٢٤ مجرى أربعة أقطاب فإذا لف هذا العضو لف متمركز Concentric Winding ثلاثة أوجه .

أوجد شكل اللف وطريقة توصيل الملفات .

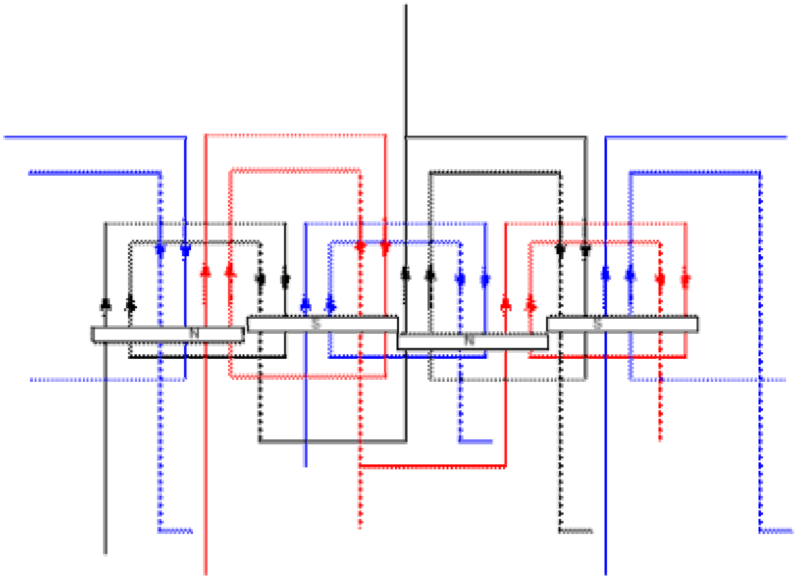
ةيبطق ةوطخ

الحل

$$y = \frac{s}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$q = \frac{s}{3 \times 2P} = \frac{24}{3 \times 4} = 2$$

أي أنه يخص كل وجه تحت كل قطب مجريتين أو جانبي ملف فقط . وحيث إن الملف مركزي فإن الوجه الأول يخص المجرى ١، ٢، ٧، ٨، ١٣، ١٤، ١٩، ٢٠ ويوضح شكل (٤ - ٣) تنظيم اللف وطريقة التوصيل الملفات بحيث تكون لفات كل وجه متصلة على التوالي .



شكل (٤ -٣)

٣,٤ - القوة الدافعة الكهربية في ملفات آلات التيار المتغير :

بافتراض أن منحنى كثافة خطوط الفيض المغناطيسية لكل قطب على مدى الخطوة القطبية ذا شكل جيبي فإن القوة الدافعة الكهربية الناتجة عن كل موصل تتغير على منحنى جيبي مع الزمن وذلك بسبب الحركة النسبية بين هذه الموصلات والمجال المغناطيسي وتكون القوة الدافعة الكهربية لكل موصل كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر هي

$$\frac{n}{60}\phi\ e_c = 22.2P \qquad (٤ - ٦)$$

حيث إن $$f = \frac{pn}{60} \qquad (٤ - ٧)$$

$$e_c = 4.44 f\phi \qquad Volt/turn$$

وحيث إن الموصلات موزعة على مجاري عضو الاستنتاج فإن القوة الدافعة الكهربية لكل وجه ليست على استقامة واحدة ولذلك لا تستطيع الحصول على القوة الدافعة الكهربية للوجه بالضرب في عدد اللفات في المعادلة (٤ - ٦) إلا إذا استخدمنا عامل تصحيح تتوقف قيمته على طريقه اللف ويطلق عليه اسم معامل اللف (Winding Factor) ويرمز له بالرمز K_W وقيمتها دائماً أقل من الواحد وعلى ذلك تكون معادلة القوة الدافعة الكهربية

$$E_{ph} = 4.44 f\phi Volt/turn \qquad (٤ - ٨)$$

وينقسم معامل اللف إلى جزأين أساسيين:

معامل التوزيع K_d وهذا المعامل ينتج لتوزيع موصلات الوجه تحت القطب في أكثر من مجرى ويعطى من المعادلة

$$K_d = \frac{\sin(q\propto/2)}{q\sin(\propto/2)} \qquad (٤ - ٩)$$

حيث q عدد المجاري لكل وجه تحت كل قطب

S عدد المجاري

$\propto$ زاوية المجرى وتحسب من القانون

$$\propto = \frac{2p\times180}{s}$$

معامل التقصير K_C وهذا المعامل ينتج عندما تكون خطوة اللف ليست عدداً صحيحاً من المجاري أي كسر فتكون خطوة اللف أقل من أو أكثر من ١٨٠ درجة كهربية وينتج عن هذا تغير في القوة الدافعة الكهربية بمقدار المعامل K_C ويعطي من المعادلة

$$K_C = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \qquad (٤ - ١٠)$$

حيث θ هي زاوية التقصير أي الفرق بين الخطوة الفعلية للملف والخطوة القطبية له . ويكون معامل التقصير $K_C = 1$ في حالة الخطوة القطبية = خطوة اللف .

ويكون معامل اللف K_W يعطى من المعادلة

$$K_W = K_C \cdot K_d \qquad (٤ - ١١)$$

مثال ١

مولد ثلاثي الوجه من النوع التوافقي له ١٦ قطب ، ١٤٤ مجرى وكل مجرى بها ١٠ موصلات . الفيض المغناطيسي هو ٠,٠٣ ويبر وموزع على شكل منحنى جيبي ويدور المولد بسرعة ٣٧٥ لفه/دقيقة. احسب جهد الوجه المتولد e.m.f وجهد الخط لهذا المولد إذا كان المولد عضو استنتاجه موصل نجمه . ارسم شكل كروكي للف عضو الاستنتاج .

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{8\times375}{60} = 50 \qquad C/S$$

$$q = \frac{144}{16\times3} = 3$$

مجرى لكل وجه تحت كل قطب

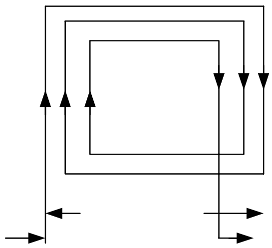
زاوية المجرى $\propto = \frac{360P}{S} = \frac{360\times8}{144} = 20°$ درجة كهربية لكل مجرى

$$\therefore K_d = \frac{\sin \frac{q \propto}{2}}{q \sin \frac{\propto}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20°}{2}}{3 \sin \frac{20°}{2}}$$

$$\therefore K_d = \frac{\sin 30°}{3 \sin 10°} = 0.96$$

أى أن

١ -١٠ خطوة اللف $y = \frac{144}{2P} = \frac{144}{16} = 9$



$\cos 0 = 1$ $K_C = 1.0$

$$\therefore K_w = K_c K_d = 0.96 = K_d$$

عدد لفات كل وجه باعتبار أن كل الموصلات للوجه متصلة على التوالي

$T_{ph} = \frac{Z}{2 \times 3}$ حيث Z عدد الموصلات الكلية بالمنتج

$$Z = S \times Z_{slot} = 144 \times 10 = 1440$$

$$turn\ T_{ph} = \frac{1440}{2 \times 3} = 240$$ (لفه)

$$E_{ph} = 4.44 F \phi T_{ph} K_w$$

$$= 4.44 \times 50 \times 0.03 \times 240 \times 0.96$$

$$E_{ph} = 1534 volt$$

$$E_{line} = \sqrt{3} E_{ph} = \sqrt{3} \times 1534$$

$$= 2655 volt$$

٤،٤ - رد فعل عضو الاستنتاج للآلات التوافقية : -

يؤدي مرور التيار في ملفات عضو الاستنتاج إلى ظهور تأثيرات مغناطيسية حولها هي ما أصفح على تسميته برد فعل المنتج كما سبق شرحه في آلات التيار المستمر مع اختلاف وهو أن الآلات المتزامنة ذات ثلاث أوجه حيث يوجد اختلاف ١٢٠درجة كهربية بين كل وجه والوجه الذي يليه . وبالتالي التيارات المارة في هذه الملفات هي الأخرى ثلاثية الوجه متغيرة مع تغير الزمن .

وينتج عن مرور هذا التيار في هذه الملفات رد فعل للمنتج ذو عدد أقطاب يساوي عدد أقطاب الآلة $2P$ وتدور هذه الأقطاب المكافئة لرد فعل عضو الاستنتاج بسرعة تساوي سرعة التزامن وفي نفس اتجاه دوران العضو الدوار الذي يدور هو الآخر بسرعة التزامن .

وتكون القوة الدافعة المغناطيسية الكلية هي محصلة جمع القوة الدافعة المغناطيسية لملفات التنبيه على الأقطاب الرئيسية وتلك الناشئة عن ملفات المنتج عند كل نقطة في الثغرة الهوائية جمعاً اتجاهياً .

وتكون القوة الدافعة الكهربية المرحلية نتيجة للقوة الدافعة المغناطيسية المرحلية ، ويطلق على المجال المغناطيسي المكافئ لرد فعل عضو الاستنتاج بالمجال المغناطيسي الدائر (Rotating Field)

وقيمة هذه القوة الدافعة المغناطيسية المكافئة لرد فعل عضو الاستنتاج تعطي بالمعادلة

$$m.m.f_{av} = 1.35\frac{T_{ph}}{p}I.K_w \qquad (٤ - ١٢)$$

٥,٤ - نظرية تشغيل الآلات المتزامنة (التوافقية) :

يتضح من تأثير رد فعل عضو الاستنتاج أنه عند وجود حمل على الآلة يتمثل في تيار لكل وجه (I_a) ويمر هذا التيار في ملفات المنتج أيضاً لاستكمال الدائرة الكهربية فإذا كان عدد لفات الوجه T_{ph} فإن ق.د.م. للمنتج تكون

$$m.m.f_a = 1.35\frac{T_{ph}}{p}I_a.K_w \qquad (٤ - ١٣)$$

وتكون مضاعفة لتلك الناتجة عن الأقطاب الأساسية $m.m.f_P$

والتي تعطي بالمعادلة

$$m.m.f_P = N_f.I_f$$

وعلى ذلك فإن

$$m.\overline{m}.f_{total} = \overline{m}.\overline{m}.f_a + m.\overline{m}.f_P$$

وبجمع المركبتين جمعاً اتجاهياً لكي نحصل على القوة الدافعة المغناطيسية الكلية للآلة التي ينشأ عنها الفيض المغناطيسي المحصل ϕ_R في الثغرة الهوائية التي تحسب على أساسه قيمة القوة الدافعة الكهربية لكل وجه E_{ph} .

ويكون جهد الأطراف V وهبوط الجهد في كل من المقاومة المرحلية (لكل وجه) R_a وممانعة التسرب لكل وجه X_l (Phase Leakage Reactance) عندما يمر تيار لكل وجه I_a لذلك فإن

$$\overline{E}_{ph} = \overline{V}_{ph} + \overline{I}_a (R_a + jX_l) \qquad (٤ - ١٤)$$

مع ملاحظة أن هذا الجمع جمعاً اتجاهياً .

وعند رفع الحمل فإن التيار يصبح صفراً ويتلاشى رد فعل عضو الاستنتاج ويصبح الفيض فقط بسبب الأقطاب الأساسية ويكون جهد الأطراف هو نفسه الجهد المتولد عند هذه الحالة E_o وتعطى من المعادلة

$$E_o = 4.44 f T_{ph} . \phi . K_W \qquad (٤ - ١٥)$$

وهذا يعني أن جهد الآلة عند الأطراف تغير من V إلى E_o ويطلق على النسبة في تغير الضغط على طرفي الآلة

$\frac{E_o - V}{V}$ اسم معامل تنظيم الجهد للآلة المتزامنة ويرمز له بالرمز ξ

$$\xi = \frac{E_o - V}{V} \qquad \text{معامل التنظيم} \qquad (٤ - ١٦)$$

لتوضيح نظرية تشغيل الآلات المتزامنة وتأثير وجود رد فعل عضو الاستنتاج سوف نعتبر الآلة من النوع ذي العضو الدائر الأسطواني ويحمل عضوه الثابت الملفات الثلاثية وبالإضافة إلى هذا سنفرض ما يأتي:

١ - الموجه المغناطيسية الناشئة من الأقطاب الرئيسية موجة جيبيه .
٢ - رد فعل عضو الاستنتاج يكون أيضاً موجه جيبية (أي لا يوجد توافقيات فيها) .
٣ - إهمال التشبع وكذلك تأثير التيارات الإعصارية والتعويق المغناطيسي .
٤ - الثغرة الهوائية ثابتة الطول أي إهمال تأثير وجود المجاري .

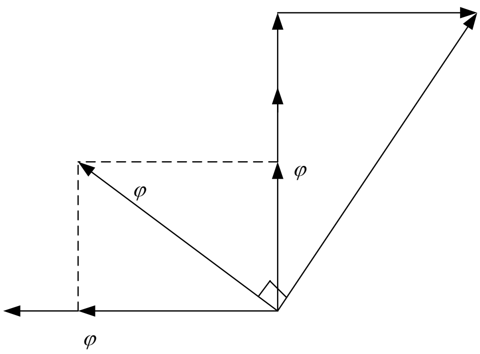
بعد هذه الفروض سوف نتعرض لحالات المولدات كما يلي :

سوف نفرض في الشكل (٤ - ١) أن التيار للحمل في نفس اتجاه القوة الدافعة الكهربية أي معامل القوة = ١ فإن المحصلة الكلية للقوة الدافعة الكهربية

$$\overline{E}_t = \overline{E} + \overline{E}_a \qquad (٤ - ١٧)$$

هي المجموع الاتجاهي وتكون متعامدة على ϕ_F

حيث ϕ_t هي المحصلة الكلية لفيض الأقطاب الأساسية والفيض الناتج عن مرور تيار الحمل ϕ_a .



شكل (٤ -٤)

يتضح من الشكل (٤ -٤) أن القوة الدافعة الكهربية في الثغرة الهوائية هي محصلة للقوة الدافعة الكهربية الناتجة عن الفيض الأصلي بالإضافة إلى القوة الدافعة الكهربية E_a الناشئة عن مرور تيار I_a وتكون متقدمة عن I_a بمقدار ٩٠ درجة.

$$E_a \; \alpha \; I_a \qquad (4\text{-}18)$$

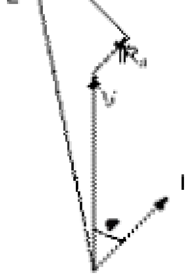
وبذلك يمكن تمثيل رد فعل عضو الاستنتاج وكذلك الجهد E_a الناتج عن جهد ضائع (مفقود) في ممانعة حثيه مقدارها يتوقف على مقدار تأثير رد فعل عضو الاستنتاج والتيار المار من الآلة إلى الحمل وذلك لأن الجهد المفقود في ممانعة حثيه يتقدم عن التيار بمقدار ٩٠ درجة وتسمى هذه الممانعة بممانعة رد فعل المنتج X_a .

وكما يوضح شكل (٤ -٢) باعتبار أن ملفات الآلة لها مقاومة مادية R_a وممانعة حثية X_a فإن الآلة المتزامنة يمكن تمثيلها بالدائرة المكافئة الموضحة .

$$Z_s = r_a + j(x_a + X_a)$$
$$= r_a + jX_s \qquad (٤ - ١٩)$$

حيث أن

$$X_s = x_a + X_a \qquad (٤ - ٢٠)$$



شكل (٤ -٥) مخطط المتجهات



شكل (٤ -٦) الدائرة الكهربية

F$_f$

ويمثل شكل (٤ - ٥) مخطط المتجهات للآلة المتزامنة التي يوضحها شكل (٤ - ٦) ويمكن تبسيط الدائرة أكثر باعتبار عدم وجود E_t ويكون العلاقة فقط بين V ، E باعتبار X_s هي الممانعة المتزامنة .

$$X_s = X_a + x_a \qquad (٤ - ٢١)$$

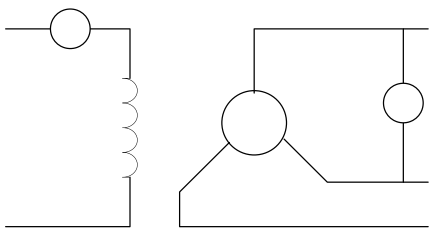
ويكون مقدار التنظيم في الجهد

$$\xi\% = \frac{E - V}{V} \times 100 \qquad (٤ - ٢٢)$$

٦,٤ - منحنيات الآلة المتزامنة (التوافقية)

أ – منحنى اللاحمل No Load Test

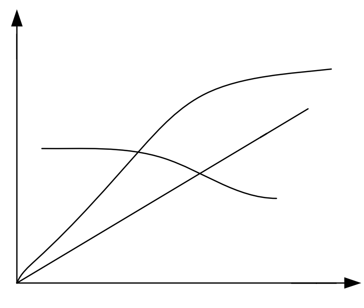
ويمكن إجراء تجربة اللاحمل على المولد المتزامن وذلك عن طريق إدارة المولد عند اللاحمل (الدائرة المفتوحة) وأخذ قراءة الجهد الطرفي مع تيار التنبيه الذي تغذى به الآلة كما هو مبين بالشكل (٤ -٧)



شكل (٤ -٧)

ويزاد في هذه التجربة تيار التنبيه تدريجياً وتأخذ قيمة الجهد وتيار التنبيه وتقاس كذلك القدرة اللازمة لإدارة الآلة عند كل قيمة من قيم التيار والجهد . ويوضح شكل (٤ - ٨) منحنى اللاحمل لمولد متزامن

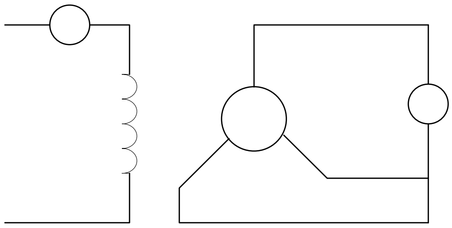
(O.C.C) " Open Circuit Charact "



شكل (٤ -٨) منحنى خواص اللاحمل والقصر

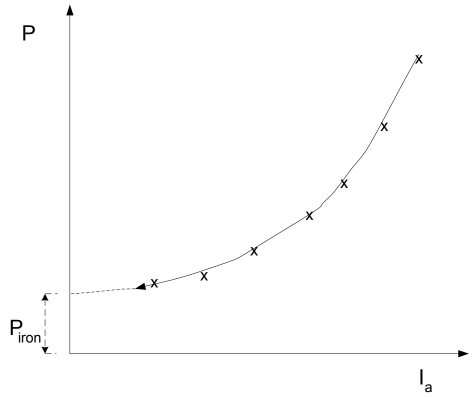
ب - تجربة القصر **Short Cir. Test**

في هذه الحالة ترتبط الأطراف الثلاثة عن طريق أميتر ثم يزداد التيار لملفات التنبيه تدريجياً وتأخذ قراءة تيار التنبيه وتيار المنتج كما في شكل (٤ -٩) .ويلاحظ أن العلاقة في هذه الحالة سوف تكون علاقة خطية .



شكل (٤ -٩) تجربة القصر

ومن هاتين التجربتين يمكن استنتاج المعاوقة المتزامنة Z_S وذلك عن طريق قسمة $\frac{E}{I_a}$ عند كل قيمة من قيم I_F ونظراً لوجود التشبع يجب ملاحظة أن Z_S تتغير كما هو موضح في شكل (٤ - ٨) ويمكن في حالة تجربة القصر تحديد القدرة المفقودة عند كل قراءة ومن القدرة المفقودة في حالتي اللاحمل والقصر يمكن تحديد منحنى المفاقيد مع تيار المنتج والذي يوضحه شكل (٤ - ١٠) .



شكل (٤ -١٠)

وينقسم فاقد الحديد إلى قسمين :

فاقد الإعصار + فاقد التعويض

كما يجب ملاحظة أن مقاومة عضو الاستنتاج صغيرة ولذلك يمكن إهمالها (حوالي ١٪ من قيمة Z_S) واعتبار أن $X_S = Z_S$ وعلى ذلك يكون تيار القصر متأخراً عن الجهد بمقدار ٩٠ درجة . ويكون رد فعل عضو الاستنتاج مضاداً تماماً للمجال الأصلي للأقطاب .

معامل التنظيم للجهد Voltage Regulatim

يعتبر معامل التنظيم من المعاملات الهامة والأساسية في الآلات المتزامنة التي نحتاج إليها كثيراً وخصوصاً فيما يتعلق بتنظيم الجهد أو لتعين طرق الحماية لهذه المولدات " Protection " أو تشغيلها على التوازي (Parallel Operation) مع مولدات أخرى .

وتختلف طرق تعيين التنظيم أو معامل التنظيم على حسب المعلومات المتوفرة لدينا عن الآلات والتي تكون عادة بيانات التصميم الواردة مع الآلة أو نتيجة للاختبارات التي أجريت عليها .

ويعرف معامل التنظيم بأنه النسبة لتغيير الضغط على طرفي الآلة من اللاحمل إلى الحمل الكامل .

ويعطى معامل التنظيم المئوي من المعادلة

معامل التنظيم $$\xi\% = \frac{E_o - V}{V} \times 100 \qquad (٤ - ٢٣)$$

حيث E_o هو الجهد عند الأطراف عند اللاحمل

V هو الجهد عند الأطراف عند الحمل الكامل

يعطينا معامل التنظيم فكرة واضحة عن مدى التغير الذي يحدث في قيمة الجهد على طرفي الآلة عند تغيير الأحمال في حدود واسعة وعند رفعه أو وضعه . وهذا يساعد المهندس بالمحطة لرفع جهد التوليد عند زيادة الأحمال حتى يصل إلى المستهلك جهد ثابت بقدر الإمكان.

وفيما يلي عرض للطرق المستخدمة لتحديد معامل التنظيم أو لتعيينه باستخدام بيانات التصميم أو نتائج الاختبارات أو كليهما ومن أهم هذه الطرق :

١ - طريقة المعاوقة المتزامنة **Syn.Impedence Method**

تستخدم هذه الطريقة في حالة المولدات ذات أقطاب من النوع الأسطواني ذات الثغرة الهوائية الثابتة ونحتاج لمعرفة Z_S ، R_a ومنها نحسب

$$X_s = \sqrt{Z_s^{\,2} - R_a^{\,2}}$$

ويوضح الشكل (٤ -١) كيفية الحصول على الجهد المتولد E في حالة التحميل بتيار I ومنها يمكن حساب التنظيم أو معامل التنظيم من المعادلة

$$\xi\% = \frac{IR_a \cos\phi + IX_s \sin\phi}{V} \times 100 \qquad (٤ - ٢٤)$$

- طريقة الأمبير لفات Ampere-turn Method

تحتاج هذه الطريقة معرفة منحنى اللاحمل وقيمة الأمبير لفات اللازمة لرد فعل عضو الاستنتاج ومعامل القدرة والتيار . وسنكتفي بالطريقة السابقة.

٧,٤ - العزم و القدرة في الآلات المتزامنة :

في آله متزامنة تغذي حمل معين بتيار I القدرة التي نحصل عليها من هذه الآلة تعطى من المعادلة

$$P_0 = 3VI\cos\phi$$ (٤ - ٢٦)

حيث I ، V هما الجهد والتيار لكل وجه .

إذا كانت E هي القوة الدافعة الكهربية المتولدة فإن الزاوية بين I ، E هي ($\phi+\delta$) وتكون القدرة الكلية التي تعطيها الآلة هي

$$P_1 = 3EI\cos(\phi+\delta)$$ (٤ - ٢٧)

و معروف أن الفرق بين القدرتين هو المفقود في النحاس في R_a

$$P_1 = 3EI\cos(\phi+\delta) = 3I(V\cos\phi + IR_a)$$ (٤ - ٢٨)

$$= 3[VI\cos\varphi + I^2R_a]$$

وغالباً ما يكون المقدار I^2R_a صغيراً وبذلك تكون تقريباً (لتسهيل الحساب)

$$P_1 \cong P_o$$ (٤ - ٢٩)

ويمكن كتابة هذه المعادلة بطريقة أخرى

$$P_1 = \frac{3EV}{X_s}\sin\delta \cong P_o$$ (٤ - ٣٠)

وعند استخدام الآلة المتزامنة كمحرك فإن استنتاج العزم يكون هاماً ويمكن الحصول عليه من المعادلة

$$T = \frac{P}{\omega}$$ (٤ - ٣١)

وحيث إن ω للمحرك ثابتة وهي سرعة التزامن أي (ω_s)

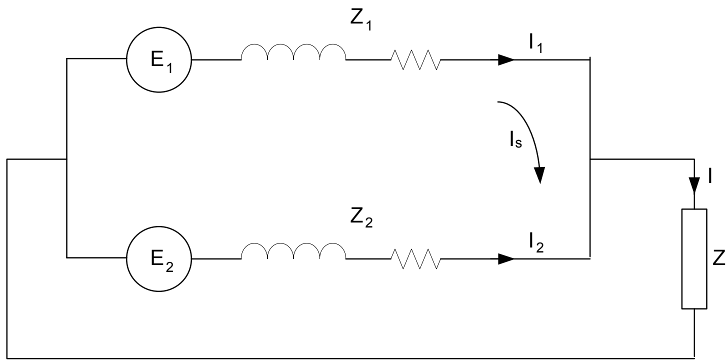
$$\therefore T = \frac{3EV}{X_s}\sin\delta.\frac{1}{w_s}$$ (٤ - ٣٢)

وتسمى الزاوية δ بزاوية القدرة أو العزم لأنه تتوقف عليها قيمة القدرة أو العزم الذين تعطيها الآلة التوافقية .

فمن المعادلة (٤ - ٣٠) ، (٤ - ٣٢) يتضح أنه عند ثبوت E أو ما يسمى الجهد المتولد أو جهد التنبيه فإن P ، T يتناسبان مع $\sin\ \delta$ ويكون منحنى القدرة والعزم على شكل منحنى جيبي.

٨,٤ - تشغيل المولدات المتزامنة على التوازي Parallel Operation of S.M.

عند توصيل مولدين على التوازي على حمل ذي معاوقة Z حيث إن E_1 ، Z_1 هـي القـدرة الدافعـة الكهربيـة المتولـدة ومعاوقـة التـزامن للآلـة والأولى ، Z_2 ، E_2 هـي القـوة الدافعـة الكهربيـة المتولـدة والمعاوقة للآلة الثانيـة والتيـار I_1 ، I_2 هـي نصيب كل آلـة مـن التيـار الكلـي للحمـل I كمـا في شـكل (٤ - ١١) .



شكل (٤ -١١)

أولا عند تساوي القوة الدافعة الكهربية أي

$$E_1 = E_2 \quad \text{،} \quad z_1 = Z_2$$

فإن التيارات

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

وعلى ذلك يكون توزيع الحمل بالتساوي بين الآلتين ، إذا تساويت E_1 ، E_2 أما إذا لم يتسـاو كـل Z_1 ، Z_1 فإن

$$E_1 = E_2 = E \qquad \bar{V} = \bar{E}_1 - \bar{I}_1\bar{Z}_1 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2\bar{Z}_2$$

$$\therefore \bar{V} = \bar{E} - \bar{I}_1\bar{Z}_1 = \bar{E} - \bar{I}_2\bar{Z}_2$$

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \qquad \bar{I}_1\bar{Z}_1 = \bar{I}_2\bar{Z}_2$$

$$\therefore \bar{I}_1 = \bar{I}\,\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \qquad (٤ - ٣٣)$$

$$\bar{I}_2 = I\,\frac{\bar{Z}_1}{Z_1 + Z_2} \qquad (٤ - ٣٤)$$

ولذلك فإن قبل توصيل المولدات التوافقية على التوازي يجب أن تراعى العوامل الآتية :

- أن يكون الجهد عند اللاحمل متساوياً في الآلتين وكذلك تماثل المعاوقات المتزامنة .
- يجب أن يكون التردد متساوياً .

- أن يكون التتابع متوافراً (التوافر الوجهي A مع A[1] ، B مع B[1]، C مع C[1]) .
- تجانس أو تماثل القطبية (Phase Shift) .

وأي عدم توافر لهذه الشروط أو بعضها يسبب مشاكل عند التوصيل لهذه المولدات وربما يحول إحداهما للعمل كمحرك ليكون حمل على المولد الآخر وقد يتسبب اختلاف الجهد إلى مرور تيار دائر بين المولدين يسمى التيار الدائر I_S ويكون لهذا التيار تأثير سيئ على ملفات المولد خصوصاً الذي يزيد تياره عند تيار الحمل الكامل. والقدرة الناتجة عن هذا التيار تسمى بقدرة التوافق (Synch. power) وهي تمثل القدرة التي تسري بين منتجين المولدين لإعادتها إلى حالة التوازن الأصلية .

$$P_s \cong E_1 I_s \cong E_2 I_2 \qquad (٤ - ٣٥)$$

وتزداد هذه القدرة بزيادة درجة الخلل بين المولدات .

وعند تقسيم الحمل الذي يوصل على مولدين فإنهما يتقاسمان الحمل وفقاً لفيض ق.ء.ك وكذلك X_S لكل منهما كما هو موضح شكل (٤ - ١١)

حيث

$$I = I_1 + I_2$$

مع ملاحظة أن المولدين لابد أن يعملا على سرعة تزامن واحدة .

ويكون التيار الدائر I_S يعطى من المعادلة

$$I_s = \frac{F_1 - E_2}{Z_1 + Z_2}$$

حيث Z_1 ، Z_2 معاوقة كل من المولدين ١ ، ٢ هما

٩,٤ - توصيل الآلات المتزامنة على قضبان لا نهائية :

A Synchronous Machine On Infinite Bus-Bars

تعتبر عملية المولدات على قضبان لا نهائية من أهم العمليات اللازمة في حالة الشبكات الكهربية للمتخصصين في التمديدات والشبكات الكهربية .

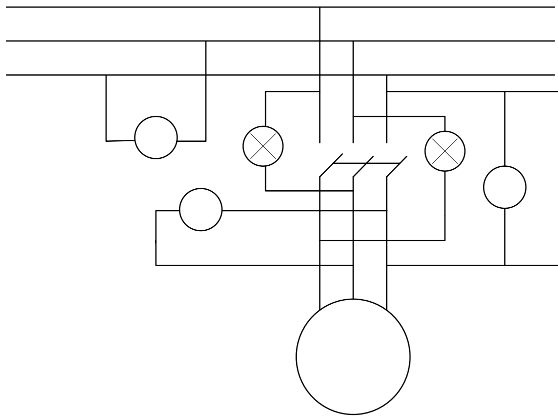
ولإجراء عملية التوصيل من آلة لقضبان لا نهائية يجب أن تتوافر الشروط الآتية :

١ - أن يكون الجهد متساوياً .

٢ - التردد متساوي تماماً .

٣ - القطبية متجانسة .

٤ - التتابع واحد .



شكل (٤ -١٢) طريقة اللمبات

وتتم ذلك عملياً بطرق مختلفة منها : -

١ - بطريقة توصيل اللمبات أو المصابيح المضيئة وتوصل فيه ثلاث لمبات كما في الشكل (٤ - ١٢) بين القضبان وبين الآلة بحيث تصل اللمبة ١ بين القضيب رقم ١ وطرف الآلة رقم ١ ثم توصل اللمبة ٢ بين القضيب ٢ وطرف الآلة ٣ وكذلك لمبة ٣ بين القضيب ٣ والطرف ٢ للآلة .

ويقال إن المصباح الأول متصل اتصال مباشر بينما يتصل المصباح ٢ ، ٣ اتصال منقطع وتبدأ عملية التزامن بضبط قراءة الأجهزة

يجب أن يكون $V_m = V_b$ وكذلك $V_S = 0$

ويحدث حالتين عند محاولة ضبط السرعة . إما أن تضيء جميعاً بطريقة غير منتظمة أو أن تضيء وتطفأ بالتتابع بطريقة دورية منتظمة .

في الحالة الأولى يكون التعاقب للأوجه مختلفاً ولذلك يلزم فقط استبدال أي طرفين من أطراف المولد الثلاثة لكي يصبح التعاقب متشابهاً للقضبان الرئيسية .

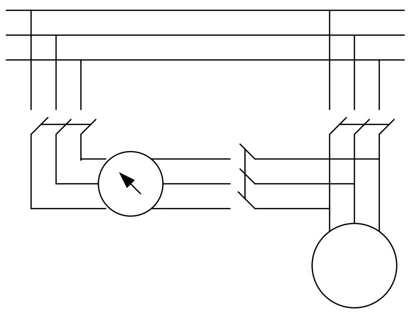
أما في الحالة الثانية فمعنى أن التعاقب متماثل . ولكن كل ما في الأمر هو أن سرعة التزامن وبالتالي التردد لم تصل إلى السرعة المطلوبة ويلزم زيادتها أو نقصانها وسوف يتضح ذلك من عملية تتابع الإضافة إذا زادت السرعة يلزم التقليل وعندما يستقر الوضع على أن يصبح المصباح رقم ١ مظلماً والمصباحين ٢ ، ٣ مضيئين بنفس درجة الإضاءة . عند هذه الحالة يلاحظ أن الآلة قد وصلت إلى حالة تسمح لها بالتوصيل بالقضبان اللانهائية وتوصل عندها عن طريق قفل دائرة التوصيل أو المفتاح S .

٢ - باستخدام جهاز التزامن **Synchroscope**

ويستخدم هذا الجهاز للمساعدة في عملية التزامن والتثبت أو التأكد من توافر جميع الشروط المطلوبة . ويحتوي هذا الجهاز على مؤشر معرض للمجال المغناطيسي وهو المجال المحصل بين المجال المغناطيسي الناشئ عن القضبان اللانهائية وتلك الناشئة عن المولد ومن حركة المؤشر إلى وضع رأسي

ثابت يدل عندها على أن الآلة والقضبان في حالة توافق تام وهي اللحظة التي عندها يمكن توصيل المولد إلى القضبان اللانهائية .

ويوضح شكل (٤ - ١٣) رسم كروكي لكيفية توصيل المولد بالقضبان اللانهائية عن طريق جهاز التزامن Synchroscope وتتم هذه العملية في كل مرة يراد توصيل مولد لم يكن متصلاً أو في حالة عدم تشغيل بالقضبان اللانهائية التي تتصل عليها مجموعة من المولدات للمشاركة في تقسيم الأعمال .



شكل (٤ -١٣) استخدام جهاز التزامن

١٠،٤ - المحركات المتزامنة (التوافقية) Synchronous Motors

المحركات المتزامنة من المحركات القليلة الاستعمال والتي تميز بثبات سرعته عند سرعة التزامن مهما تغير الحمل على هذا النوع من المحركات حيث

$$n_s = \frac{60f}{P} \qquad (٤ - ٣٨)$$

وعلى ذلك فطالما التردد للمنبع المتصل عليه المحرك ثابت تظل السرعة ثابتة فيستخدم هذا المحرك فقط في الحالات التي تتطلب سرعة ثابتة عند كافة الظروف .

ولكن نظرا لأن العزم يتناسب مع $(\sin\delta)$ من المعادلة (٤ - ٣٢)

$$T = \frac{3EV}{X_s}\sin\delta . \frac{1}{w_s}$$

فإن العزم الناشئ يكون على شكل موجه جيبية متوسطة يساوي صفراً وعليه لا يستطيع المحرك أن يبدأ حركته بنفسه . ولكن ينتج هذا المحرك عزماً فقط عند سرعة التزامن . وعلى ذلك فيجب أن تدار الآلة حتى تصل سرعتها إلى سرعة التزامن وعندها يبدأ عمل المحرك كمحرك توافقي. وهكذا تكون هناك مشكلة إنتاج عزم لبدأ الحركة وإدارة المحرك حتى هذه السرعة .

١,١٠,٤ - طرق بدء حركة المحركات المتزامنة

١ - أن يدار المحرك عن طريق محرك صغير حتى تصل سرعته إلى سرعة قريبة من سرعة التزامن مع التنبيه اللازم ثم توصله عند هذه النقطة على المنبع الكهربي بعد إجراء التوافق أو التزامن كما سبق توضيحها في البند السابق مع المولدات .

٢ - باستخدام قضبان تخميد Damping Coils وفيها توضع قضبان على أحذية الأقطاب وتقصر هذه القضبان بحلقات نحاسية وبذلك تشبه إلى حد كبير القفص السنجاب في حالة المحركات التأثيرية .

ويبدأ المحرك في هذه الحالة حركته كمحرك تأثيري ذي قفص سنجاب وتبدأ في هذه الحالة دائرة التنبيه مفتوحة ويزاد الجهد تقريباً حتى يصل إلى قرب القيمة المقننة حتى تصل السرعة إلى قرب السرعة المتزامنة . وعند ذلك تغلق دائرة التنبيه فيأخذ المحرك في زيادة السرعة حتى تصل إلى سرعة التزامن ويعمل في هذه الحالة كمحرك توافقي .

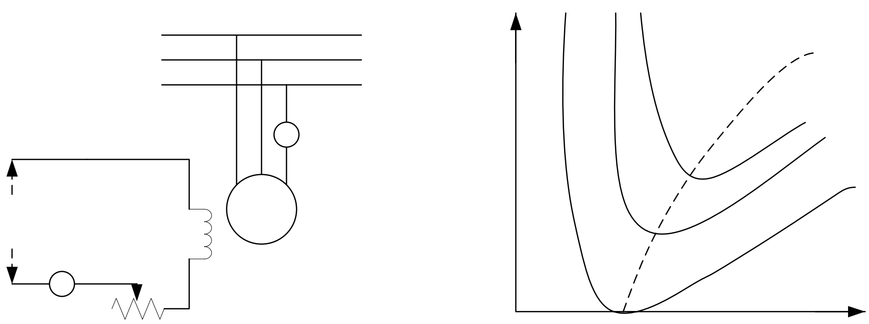
٢,١٠,٤ - منحنيات V " The V-Curves " للمحرك المتزامن :

وهي نوع من المنحنيات تحدد خواص التشغيل للمحرك وهو منحنى يبين تيار عضو الاستنتاج وتيار ملفات التنبه وذلك عند تثبيت القدرة عند قيمة ثابتة لكل منحنى .

ويوضح شكل (٤ - ١٤) دائرة توصيل المحرك في تجربة لتحديد V-Curves لمحرك متزامن .

وتجرى التجربة أولاً عند اللاحمل وتغير قراءة التيار اللازم للتنبيه وتأخذ قراءته وكذلك تيار الحمل ويرسم منحنى ثم يكرر هذا مع أحمال مختلفة ½ ، ¼ ، F.L وتسمى هذه المنحنيات V-Curves نظراً لأنها تشبه حرف V في اللغة الإنجليزية . ويوضح هذا شكل (٤ - ١٥) .

يقصد بكلمة Lead معامل قدرة متقدمة وكذلك Lag معامل قدرة متأخر وعند منتصف المنحنى يكون معامل القدرة الوحدة وذلك فإن الخط الواصل بين هذه النقط يسمى خط معامل القدرة الوحدة وهو الخط المنقط Unity P.F. line



شكل (٤ - ١٥) منحنيات في   شكل (٤ - ١٤) دائرة توصيل المحرك

٣,١٠,٤ - الكفاءة (الجودة) **Efficiency**

بمجرد تحديد المفاقيد الخاصة بالآلة المتزامنة يمكن حساب معامل الجودة أو الكفاءة .

وتنقسم المفاقيد إلى عدة أنواع سواء كانت الآلة مولد أو محرك كما يلي : -

المفاقيد النحاسية وهي قسمان وهما مفاقيد النحاس في ملفات المنتج وكذلك مفاقيد النحاس في ملفات عضو التنبيه .

المفاقيد الحديدية .

مفاقيد الاحتكاك .

وبتحديد أنواع المفاقيد وكذلك قدرة المخرج للمولد أو قدرة الدخل بالنسبة للمحرك

$$P_o = \sqrt{3} VI \cos\phi$$

$$P_i = \sqrt{3} VI \cos\phi$$

ويمكن تحديد معامل الجودة

$$\xi\% = \frac{P_o}{P_o + losses} \times 100 \qquad (٤ - ٣٩)$$

$$\xi\% = \frac{P_o - losses}{P_o} \times 100 \qquad (٤ - ٤٠)$$

٤,١٠,٤ - بعض الاستخدامات الخاصة بالآلة المتزامنة : -

تستخدم الآلة المتزامنة في بعض الحالات في ظروف تشغيل خاصة ومنها :

١ - المكثف المتزامن The Syn.Capacitor (compensator)

تكون هذه الآلة عبارة عن محرك تزامني يدور عند اللاحمل ومصمم للعمل على مدى واسع لتغيير تيار المجال . ويأخذ المحرك تياراً متقدماً في هذه الحالة مثل المكثف الثلاثي الأطوار بقدرة يمكن التحكم فيها وتصل قدرتها إلى وحدات ذات قدرة ١٠٠ ميجافولت أمبير أو أكثر وتوضع على خطوط القدرة للتحكم في الجهد عند نقط مختلفة على خطوط نقل القدرة .

٢ - تصحيح معامل القدرة **Power-Factor Correction**

تحتاج معظم مكونات المعدات الكهربائية إلى تيار بمعامل قدرة متأخر أثناء تشغيلها الاعتيادي ولتحسين معامل القدرة لأي منشأه معينة فإنه يلزم تركيب بعض المعدات التي تأخذ معامل قدرة متقدماً ولذلك ينخفض التيار الكلي المأخوذ وتنخفض المفقودات وكذلك التكاليف النقدية وقد يبدو اقتصادياً استعمال مكثفات إستاتيكية لهذا الغرض ولكن المكثف التزامني له الميزات الإضافية أن يمكن توفير قدرة ميكانيكية كما يمكن التحكم في معامل القدرة عن طريق تغير تيار المجال . ولذلك يستخدم بكثرة المكثف المتزامن في دوائر القدرة وشبكات نقل القدرة التي لها معامل قدرة صغير ويحتاج إلى تعديل. وكذلك في المصانع معامل القدرة فيها صغير نظراً لاستخدام أحمال ذات معامل قدرة متأخر .

٥,١٠,٤ - **أمثلة منوعة ومحلوله على الآلات المتزامنة :**

مثال ١

مولد متزامن يحتوي على ٧٢ مجرى ثلاثة أوجه ، ٦ أقطاب ملفوف بطريقة طبقتين كل ملف يحتوي على ٢٠ لفة ، خطوة الملف $\frac{5}{6}$ من الخطوة القطبية . المجال المغناطيسي لكل قطب 4.8×10^{6} خط (0.048) وبر وتدار الآلة ١٢٠٠ لفة/دقيقة .

احسب : أ - معامل التوزيع K_d ب - معامل الخطوة K_C

ج - القوة الدافعة الكهربية المتولدة لكل وجه .

الحل:

$$F=\frac{pn}{60}=3\times\frac{1200}{60}=60\,c/s$$

$$\theta=180-\frac{5}{6}\times180 \quad , \quad K_c=\cos\frac{\theta}{2}$$

$$=180-150=30^\circ$$

$$\therefore K_c=\cos\frac{30}{2}=0.967$$

$$q=\frac{72}{3\times 6}=\frac{\text{عددالمجاري}}{\text{عددالأوجة}\times\text{عددالأقطاب}}=4$$

$$\propto=\frac{6\times 180}{72}=15^\circ$$

$$K_d=\frac{\sin(q\propto/2)}{q\sin(\propto/2)}=\frac{\sin(4\times 15/2)}{4\sin(15/2)}$$

$$\therefore K_d=0.95 \quad ، \quad K_w=K_d.K_c$$

$$T_{ph}N=\frac{2\times 20\times 72}{2\times 3}=480Turn$$

$$=\frac{20\times 72}{3}=480Turn$$

$$E_{ph}=4.44f\phi T_{ph}K_w$$

$$=4.44\times 60\times 0.048\times 480\times 0.95\times 0.917$$

$$E_{ph}=5347Volt$$

مثال ٢ :

مولد ثلاثي الوجه ١٦ قطب يدور بسرعة ٣٧٥ لفه/دقيقة ويحتوي على ١٤٤ مجرى كل مجرى بها ٧ موصلات وكل وجه مكون من دائرتين على التوازي فإذا كان الفيض المغناطيسي ٠,٠٣٨٩ وبر أوجد القوة الدافعة الكهربية لكل وجه وكانت خطوة اللف ١٦٠ درجة . أوجد كذلك جهد الخط إذا كان المولد موصل نجمة .

الحل :

$$q=\frac{144}{3\times 16}=3$$

$$f=p\frac{n}{60}=8\times\frac{375}{60}=50c/s$$

زاوية التغير $\theta=180-160=20^\circ$

$$K_c=\cos\frac{\theta}{2}=\cos\frac{20}{2}=0.985$$

$$\propto=\frac{180}{3\times 3}=20^\circ$$

$$K_d=\frac{\sin(q\propto/2)}{q\sin\left(\frac{\propto}{2}\right)}=\frac{\sin(3\times 20/2)}{3\sin\left(\frac{20}{2}\right)}$$

$$K_d = 0.96$$

عدد الموصلات الكلية

$$Z = 144 \times 7 = 1008$$
$$N = \frac{Z}{2 \times 3 \times 2} = \frac{1008}{12} = 84 Turn$$
$$E_{ph} = 4.44 f \phi N K_c K_d$$
$$= 4.44 \times 50 \times 0.0389 \times 84 \times 0.985 \times 0.96$$
$$= 6859$$
$$\therefore E_{line} = \sqrt{3} \times 6859 = 11880$$

مثال ٣

مولد متزامن ثلاثي الأوجه موصل نجمة ٥٠ ذبذبة/ثانية . ١٠٠٠كيلوفولت أمبير ومعامل التنظيم له ٢٥٪ عند الحمل الكامل عندما يكون جهد الأطراف ٣٣٠٠ فولت ويدار عند سرعة ٣٧٥ لفه/دقيقة . عدد المجاري لكل قطب لكل وجه $q = 3$ ومعامل اللف (٠٫٩٦) فإذا كان الفيض لكل قطب ٠٫٠٥٨١ وبر .

احسب عدد الموصلات الموجودة في كل مجرى .

الحل :

$$f = \frac{pn}{60} \qquad \therefore P = \frac{60 \times 50}{375} = \delta$$
$$V = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1905V$$
$$\xi\% = 25 = \frac{E_o - V}{V}$$
$$\therefore 0.25 = \frac{E_o - 1905}{1905} \quad , \quad \therefore E_o = 2381.25 Volt$$
$$E = 4.44 f \phi N K_w \quad , \quad 2381.25 = 4.44 \times 50 \times 0.0581 \times N_{ph} \times 0.96$$
$$N_{ph} = 192 turn$$
$$cond = \frac{192 \times 2}{3 \times 16} = 8 cond$$

مثال ٤ :

محرك متزامن ثلاثة اوجه موصل نجمه ٢٣٠٠ فولت له مقاومة ٠,٢ أوم وممانعة التزامن ٢,٢ أوم ويعمل المحرك عند معامل قدرة ٠,٥ متقدم والتيار ٢٠٠ أمبير .

أحسب : القوة الدافعة الكهربية لكل وجه .

الحل :

برسم مخطط المتجهات لكل من الجهد I_{ph} ، V_{ph}

$$V_{ph} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1328$$

$$I_{ph} = 200A$$

وبينهما زاوية $\cos^{-1} 0.5$ وهي $60°$ متقدم أي أن التيار متقدم عن الجهد بمقدار $60°$

ومن مخطط المتجهات

$$E_{ph} = \sqrt{(V\cos\phi - IR)^2 + (V\sin\phi + IX)^2}$$

$$E_{ph} = \sqrt{(1328\times 0.5 - 200\times 0.2)^2 + (1328\times 0.868 + 200\times 2.2)^2}$$

$$E_{ph} \cong 1708 volt$$

وواضح أن E_{ph} هي القوة الدافعة الكهربية المضادة وهي أكبر من جهد الأطراف وذلك بسبب معامل القدرة المتقدم .

مثال ٥

محرك متزامن وجه واحد يغذى بجهد ٢٥٠فولت له مقاومة ٠,٤ وممانعة ٤ أوم فإذا كانت القدرة التي يعطيها هذا المحرك ٤٠٠٠ وات متضمنة مفاقيد الحديد والاحتكاك . احسب :

تيار المنتج عند معامل القدرة الواحدة . القوة الدافعة الكهربية المتولدة .

الحل :

$$\cos\phi = 1.0$$

$$P = VI\cos\phi - I^2 R$$

$$4000 = 250I - 0.4I^2$$

$$0.4I^2 - 250I + 4000 = 0$$

$$I = \frac{250 \pm \sqrt{(250)^2 - 4\times 0.4\times 4000}}{2\times 0.4}$$

$$\therefore I = 16.5 Amp$$

$$E = \sqrt{(V\cos\phi - IR)^2 + (V\sin\phi + IX)^2}$$
$$= \sqrt{(250 - 16.5\times 0.4)^2 + (16.5\times 4)^2}$$

$$\therefore E = 252.2V$$

المراجع

Principles of Electric Machines and Power Electronics
P.c sen

Electrotechnique industrielle
Guy Seguier
Francis Notelet

Technologies et schemas d'electricite'
Henry Ney

Machines Electriques , Electronique de puissance
Alain Hebert
Claude Naudet
Michel Pinard

Dino Zorbas, "Electric machines ،"
West publishing company st. Paul, 1989.

Turan Gonen, "Electrical machines ،"
Power international. Press. Garmichael, California, 1998.

جون هندماش "المكائن الكهربائية"
ترجمة وإعداد الاستاذ الدكتور إبراهيم فؤاد العرباوي
كلية الهندسة- جامعة الاسكندرية

المحتويات

الفصل الأول : آلات التيار المستمر

١,١- الدوائر المغناطيسية

٢,١- آلات التيار المستمر

الفصل الثاني : المحولات الكهربائية

الفصل الثالث :المحركات التأثيرية (الحثية) الثلاثية الأوجه

الفصل الرابع : الآلات التوافقية (التزامنية)